

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Návrh parního kotle na biomasu o výkonu 22 t/h páry

Draft Steam Biomass Boiler Output of 22 t/h of Steam

Student:

Bc. Filip Ďurčat

Vedoucí diplomové práce:

doc. Dr. Ing. Bohumír Čech

Ostrava 2015

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Filip Ďurčat

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

2302T006 Energetické stroje a zařízení

Téma:

Návrh parního kotle na biomasu o výkonu 22 t/h páry
Draft Steam Biomass Boiler Output of 22 t/h of Steam

Zásady pro vypracování:

Vypracujte návrh spalovacího zařízení na vlhkou dřevní štěpku o jmenovitém výkonu 22 t/h páry spolupracujícího s parní turbínou.

Diplomová práce bude obsahovat:

1. Přehled spalovacích zařízení na biomasu s produkcí páry.
2. Základní bilanční výpočty množství spalin a spotřeby paliva.
3. Výpočet hlavních rozměrů a bilance teplosměnných ploch.
4. Základní návrh koncepce parního kotle.

Grafické práce:

1. Konstrukční návrh kotle.
2. Výkresová dokumentace schéma zapojení kotle.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Černý, V. a kol. Parní kotle a spalovací zařízení, SNTL Praha 1975.
- [2] Kolat, P. Přenos tepla a hmoty, skripta VŠB Ostrava 1987.
- [3] ON 074017 Tepelný výpočet parních kotlů.
- [4] Dlouhý, T. Výpočty kotlů a spalínových výměníků, skripta ČVUT Praha 2005
- [5] Podklady a materiály katedry energetiky pro návrh kotle na biomasu.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Dr. Ing. Bohumír Čech**

Datum zadání: 13.12.2014

Datum odevzdání: 18.05.2015




prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Prehlásenie študenta

Prehlasujem, že som celú diplomovú prácu vrátane príloh vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce a uviedol som všetky použité podklady a literatúru.

Prehlasujem, že

- som bol oboznámený s tým, že na moju diplomovú prácu sa plne vzťahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, najmä § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beriem na vedomie, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (ďalej len „VŠB – TUO“) má právo nezárobkovo ku svojej vnútornej potrebe diplomovú prácu požiť (§ 35 odst. 3.).
- súhlasím s tým, že diplomová práca bude v elektronickej podobe uložená v Ústrednej knižnici VŠB – TUO k nahliadnutiu a jeden výtlačok bude uložený u vedúceho diplomovej práce. Súhlasím s tým, že údaje o kvalifikačnej práci budú zverejnené v informačnom systéme VŠB – TUO.
- bolo dohodnuté, že VŠB – TUO, v prípade záujmu z jej strany, uzavrie licenčnú zmluvu s oprávnením použiť toto dielo v rozsahu § 12 odst. 4. autorského zákona.
- bolo dohodnuté, že použiť svoje dielo – diplomovú prácu alebo poskytnúť licenciu k jej využitiu môžem len so súhlasom VŠB – TUO, ktorá je oprávnená v takom prípade odo mňa požadovať primeraný príspevok na úhradu nákladov, ktoré boli VŠB – TUO na vytvorenie diela vynaložené (až do ich skutočnej výšky).
- beriem na vedomie, že odovzdaním diplomovej práce súhlasím so zverejnením svojej práce podľa zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o zmene a doplnení ďalších zákonov (zákon o vysokých školách), v znení neskorších predpisov, bez ohľadu na výsledky jej obhajoby.

V Tlmačoch 17.05.2015



podpis

Meno a priezvisko autora práce: Filip Ďurčat

Adresa trvalého bydliska autora práce: Cinotrínska 245/42, 935 21 Tlmače , Slovenská Republika

Pod'akovanie

Rád by som poďakoval vedúcemu diplomovej práce doc. Dr. Ing. Bohumírovi Čechovi za odborné vedenie, ochotu, cenné rady, pripomienky a odovzdanie mnohých skúseností pri vedení mojej diplomovej práce.

ANOTÁCIA DIPLOMOVEJ PRÁCE

ŽURČAT, F. *Návrh parního kotla na biomasu o výkonu 22 t/h páry : diplomová práce.* Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2015, 131 s. Vedúci práce: doc. Dr. Ing. Bohumír Čech

Diplomová práce pozostáva z návrhu parného kotla na biomasu. V úvodnej časti diplomovej práce je základný bilančný výpočet okruhu parného kotla v spojení s parnou turbínou. Hlavná časť diplomovej práce pozostáva zo stechiometrických výpočtov a následného návrhu veľkostí teplovýmenných plôch parného kotla a ich konštrukčného a dispozičného riešenia. V závere diplomovej práce je určenie variabilných nákladov okruhu parného kotla s turbínou.

Kľúčové slová: návrh, parný kotol, biomasa

ANNOTATION OF MASTER THESIS

ŽURČAT, F. *Draft Steam Biomass Boiler Output of 22 t/h of Steam : Master Thesis.* Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power Engineering, 2015, 131 p. Thesis head: doc. Dr. Ing. Bohumír Čech

The Master thesis consists of steam biomass boiler draft. The introductory part of the Master thesis includes a balance sheet calculation of steam boiler and steam turbine circle. The main part of the thesis focuses on stoichiometric calculation and design of steam boiler heat transfer surfaces in terms of their construction and positioning. The conclusion of the thesis contains specification of variable costs of steam boiler circle with steam turbine.

Key words: draft, steam boiler, biomass

Obsah

Zoznam použitých značiek a symbolov	9
Úvod.....	19
1 Spôsoby využitia biomasy na energetické účely	21
1.1 Spaľovanie biomasy	22
1.2 Konštrukčné riešenie kotla na spaľovanie biomasy.....	23
1.2.1 Fluidné ohnisko.....	23
1.2.2 Roštové ohnisko.....	24
1.2.3 Kombinované ohnisko.....	25
2 Bilančný výpočet celého okruhu	27
2.1 Zadané hodnoty	27
2.2 Výpočet.....	28
3 Stechiometria spaľovania.....	31
3.1 Prvkový rozbor drevnej štiepky.....	31
3.2 Minimálne množstvá vzduchu a spalín	31
3.3 Koncentrácia zložiek skutočných vlhkých spalín:	33
3.4 Entalpia vzduchu a spalín	34
4 Tepelná bilancia kotla	37
4.1 Tepelné straty parného kotla	37
4.2 Výrobné teplo pary a množstvo paliva.....	39
5 Rozdelenie tepelného výkonu kotla.....	40
5.1 Výkon ohrievača vody (EKA)	40
5.2 Výkon výparníka	40
5.3 Výkon závesných rúr	41
5.4 Výkon prehrievača pary:.....	41
5.5 Tepelný výkon všetkých teplovýmenných plôch.....	42
5.6 Tepelné bilancie jednotlivých teplovýmenných plôch:	43
5.6.1 Tepelná bilancia ohrievača vzduchu.....	43
5.6.2 Tepelná bilancia ohrievača vody	43
5.6.3 Tepelná bilancia prvej časti prehrievača pary	44
5.6.4 Tepelná bilancia druhej časti prehrievača pary	44
5.6.5 Tepelná bilancia tretej časti prehrievača pary.....	45
6 Výpočet ohniska (spaľovacej komory)	47
7 Výpočet mreže medzi I. a II. ťahom	53
8 Výpočet II. ťahu kotla	58
9 Výpočet výsycky medzi II. a III. ťahom.....	63
10 Výpočet III. ťahu.....	69
10.1 Prvá časť III. ťahu	69

10.1.1	Hlavná výhrevná plocha PP3	70
10.1.2	Výpočet membránovej steny	75
10.1.3	Výpočet závesných rúr	78
10.2	Druhá časť III. ťahu	82
10.2.1	Hlavná výhrevná plocha PP2	83
10.2.2	Výpočet membránovej steny	88
10.2.3	Výpočet závesných rúr	91
10.3	Tretia časť III. ťahu	95
10.3.1	Hlavná výhrevná plocha PP1	96
10.3.2	Výpočet membránovej steny	101
10.3.3	Výpočet závesných rúr	104
11	Výpočet štvrtého a piateho ťahu kotla	108
11.1	Výpočet druhej časti ohrievača vody (EKO II.)	108
11.2	Výpočet druhej časti ohrievača vzduchu (OVZ II):	112
11.3	Výpočet prvej časti ohrievača vody (EKO I.)	118
11.4	Výpočet prvej časti ohrievača vzduchu (OVZ I):	122
12	Kontroly tepelnej bilancie kotla	127
13	Určenie variabilných nákladov	128
	Záver	129
	Zoznam použitej literatúry	130
	Zoznam príloh	131

Zoznam použitých značiek a symbolov

a	- predná stena	[m]
A^r	- obsah popola v surovom palive	[%]
a_o	- stupeň čiernosti plameňa	[-]
a_{pl}	- efektívny stupeň čiernosti plameňa	[-]
a_u	- pomerný úlet popolčeka	[-]
a_z	- pomerné zachytenie trosky	[-]
a_{za}	- stupeň čiernosti zanesených stien sálavých plôch	[-]
b	- bočná stena	[m]
B_o	- Boltzmanovo kritérium	[-]
c	- výška mreže	[m]
$\overline{c_B}$	- stredná špecifická tepelná kapacita spalín	[kJ . kg ⁻¹ . K ⁻¹]
C^r	- obsah uhlíka v surovom palive	[%]
c_{pv}	- tepelná kapacita paliva	[J . kg ⁻¹ . K ⁻¹]
C_s	- korekcia na geometrickú konfiguráciu	[-]
c_{su}	- tepelná kapacita sušiny paliva	[J . kg ⁻¹ . K ⁻¹]
c_{vz}	- tepelná kapacita vzduchu	[J . kg ⁻¹ . K ⁻¹]
c_w	- tepelná kapacita vody	[J . kg ⁻¹ . K ⁻¹]
C_z	- korekcia na počet radov rúr	[-]
Cl^r	- obsah chlóru v surovom palive	[%]
d	- vnútorný priemer	[m]
D	- vonkajší priemer	[m]
d_{ek}	- ekvivalentný priemer	[m]
d_{pk}	- stredný priemer častíc popolčeka	[μm]
daf_{tr}	- obsah horľaviny v troske	[%]

daf_u	- obsah horľaviny v popole	[%]
F_s	- prierez spalínovodu	[m ²]
h	- výška	[m]
H^r	- obsah vodíka v surovom palive	[%]
i	- počet závesných rúr	[-]
i_{120}	- entalpia 120 ° C vody	[kJ . kg ⁻¹]
i_{140}	- entalpia 140 ° C vody	[kJ . kg ⁻¹]
i_4	- entalpia pary na vstupe do turbíny	[kJ . kg ⁻¹]
i_{5a}	- entalpia pary na výstupe z turbíny adiabatická	[kJ . kg ⁻¹]
i_{5s}	- entalpia pary na výstupe z turbíny skutočná	[kJ . kg ⁻¹]
I_{II}^s	- entalpia spalín za druhým ťahom	[kJ . kg ⁻¹]
i_{Ar}^t	- merná entalpia argónu	[kJ . kg ⁻¹]
$i_{CO_2}^t$	- merná entalpia oxidu uhličitého	[kJ . kg ⁻¹]
$i_{H_2O}^t$	- merná entalpia vodnej pary	[kJ . kg ⁻¹]
$i_{N_2}^t$	- merná entalpia dusíka	[kJ . kg ⁻¹]
i_b	- entalpia vody v kotlovom telese	[kJ . kg ⁻¹]
i_k	- entalpia spalín na výstupe z ohrievača vzduchu	[kJ . kg ⁻¹]
I_{mre}^s	- entalpia spalín za mrežou	[kJ . kg ⁻¹]
i_{nv}	- entalpia napájacej vody	[kJ . kg ⁻¹]
i_{odp}	- entalpia pary na vstupe do odplyňovača	[kJ . kg ⁻¹]
i_{pop}^t	- merná entalpia popola	[kJ . kg ⁻¹]
i_p	- entalpia vody na výstupe z výparníka	[kJ . kg ⁻¹]
i_{pp}	- entalpia prehriatej pary	[kJ . kg ⁻¹]
i_{pp1}	- entalpia pary za prehrievačom pary 1	[kJ . kg ⁻¹]

i_{PP2}	- entalpia pary za prehrievačom pary 2	[kJ . kg ⁻¹]
i_{PP1vs}	- entalpia pary za vstrekom č. 1	[kJ . kg ⁻¹]
i_{PP2vs}	- entalpia pary za vstrekom č. 2	[kJ . kg ⁻¹]
$i_S^{t,\alpha}$	- entalpia vzniknutých spalín s prebytkom vzduchu	[kJ . kg ⁻¹]
$i_{SO_2}^t$	- merná entalpia oxidu siričitého	[kJ . kg ⁻¹]
i_{sEKO}	- entalpia spalín na vstupe do ohrievača vody	[kJ . kg ⁻¹]
i_{sOVZ}	- entalpia spalín na vstupe do ohrievača vzduchu	[kJ . kg ⁻¹]
i_{sPP1}	- entalpia spalín na vstupe do prehrievača pary 1	[kJ . kg ⁻¹]
i_{sPP2}	- entalpia spalín na vstupe do prehrievača pary 2	[kJ . kg ⁻¹]
i_{sPP3}	- entalpia spalín na vstupe do prehrievača pary 3	[kJ . kg ⁻¹]
$i_{S\ min}^t$	- entalpia teoreticky vzniknutého množstva spalín	[kJ . kg ⁻¹]
i_{tr}	- entalpia trosky	[kJ . kg ⁻¹]
i_{vEKO}	- entalpia vody na výstupe z ohrievača vody	[kJ . kg ⁻¹]
i_{vzin}	- entalpia vzduchu na vstupe	[kJ . kg ⁻¹]
$i_{V\ min}^t$	- entalpia teoreticky potrebného množstva vzduchu	[kJ . kg ⁻¹]
i_{vys}^s	- entalpia spalín na výstupe z výsypky	[kJ . kg ⁻¹]
i_{vzout}	- entalpia vzduchu na výstupe	[kJ . kg ⁻¹]
i_{zr}	- entalpia pary na výstupe zo závesných rúr	[kJ . kg ⁻¹]
k	- súčiniteľ prestupu tepla	[W . m ⁻² . K ⁻¹]
k_p	- súčiniteľ oslabenia sálania popolčekovými časticami	[m ⁻¹ . MPa ⁻¹]
k_s	- súčiniteľ oslabenia sálania trojatom. plynmi a vodnými parami	[m ⁻¹ . MPa ⁻¹]
l_e	- dĺžka radu rúr v reze	[m]
M	- parameter	[-]
M_o	- množstvo odluhu	[kg . s ⁻¹]

M_p	- množstvo pary pre turbínu	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
M_{pal}	- množstvo paliva privedeného do kotla	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
M_{podp}	- množstvo pary pre odplyňovač	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
M_{pp}	- parný výkon kotla	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
M_{pv}	- množstvo skutočne spáleného paliva	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
M_{sp}	- hmotnosť spalín	$[\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$
M_v	- množstvo vstreku	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
n	- počet hadov	$[-]$
N^f	- obsah dusíka v surovom palive	$[\%]$
O	- Obvod	$[\text{m}]$
O_{Ar}	- množstvo argónu	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
O_{CO_2}	- množstvo oxidu uhličitého	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
$O_{\text{H}_2\text{O}, \text{min}}^{\text{sp}}$	- minimálne množstvo vodnej pary v spalínach	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
$O_{\text{H}_2\text{O}}^v$	- objem vodnej pary vo vzduchu	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
O_{N_2}	- množstvo dusíka	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
$O_{\text{O}_2, \text{min}}$	- minimálne množstvo kyslíka	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
$O_{2\text{ref}}$	- referenčná hodnota kyslíka	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
O_{SO_2}	- množstvo oxidu siričitého	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
$O_{\text{sp}, \text{min}}^s$	- minimálne množstvo suchých spalín	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
O_{sp}^v	- skutočné množstvo vlhkých spalín	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
$O_{\text{sp}, \text{min}}^v$	- minimálne množstvo vlhkých spalín	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
$O_{\text{vz}, \text{min}}^s$	- minimálne množstvo suchého vzduchu	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
$O_{\text{vz}, \text{min}}^v$	- minimálne množstvo vlhkého vzduchu	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$

O^r	- obsah kyslíka v surovom palive	[%]
p	- tlak	[MPa]
p_4	- tlak pary na vstupe do turbíny	[MPa]
p_c	- súčet parciálnych tlakov vodných pár a trojatom. plynov	[MPa]
P_{el}	- elektrický výkon na svorkách generátora	[MW]
p_{nv}	- tlak napájacej vody	[MPa]
P_{odp}	- výkon odplyňovača	[kW]
p_{pp}	- tlak prehriatej pary	[MPa]
p_{PP1}	- tlak pary za prehrievačom pary 1	[MPa]
p_{PP2}	- tlak pary za prehrievačom pary 2	[MPa]
Pr	- Prandtlovo číslo	[-]
\dot{Q}	- tepelný tok	[kJ]
$Q_{II.}$	- teplo odobrané v II. ťahu kotla spalínám	[kW]
Q_c	- teplo stratené horľavinou v tuhých zvyškoch	[kJ . kg ⁻¹]
Q_{CO}	- teplo stratené horľavinou v spalínach	[kJ . kg ⁻¹]
Q_{EKO}	- tepelný výkon ohrievača vody	[kW]
Q_{fi}	- teplo stratené fyzickým teplom tuhých zvyškov	[kJ . kg ⁻¹]
Q_k	- teplo stratené citeľným teplom spalín	[kJ . kg ⁻¹]
Q_{mre}	- teplo prebrané mrežou	[kW]
Q_{in}	- teplo vstupujúce	[kW]
Q_i	- tepelný výkon	[kW]
Q_i^r	- výhrevnosť surového paliva	[kJ]
Q_{os}	- teplo prebrané v ohnisku	[kW]
Q_{out}	- teplo výstupujúce	[kW]
Q_{OVZ}	- tepelný výkon ohrievača vzduchu	[kW]

Q_{par}	- tepelný výkon paralelných výhrevných plôch	[kW]
Q_{PP1}	- tepelný výkon prehrievača pary 1	[kW]
Q_{PP2}	- tepelný výkon prehrievača pary 2	[kW]
Q_{PP3}	- tepelný výkon prehrievača pary 3	[kW]
Q_{pri}	- teplo privedené do parného kotla	[kJ . kg ⁻¹]
Q_{pv}	- fyzické teplo paliva	[kJ . kg ⁻¹]
q_s	- tepelné zaťaženie roštu	[kW . m ⁻²]
Q_{sEKO}	- strata tepla ohrievačom vody	[kW]
Q_{sOVZ}	- strata tepla ohrievačom vzduchu	[kW]
Q_{sPP1}	- strata tepla prehrievača pary 1	[kW]
Q_{sPP2}	- strata tepla prehrievača pary 2	[kW]
Q_{sPP3}	- strata tepla prehrievača pary 3	[kW]
Q_u	- teplo uvoľnené v ohnisku	[kJ . kg ⁻¹]
$\overline{q_{\text{us}}}$	- stredné tepelné zaťaženie účinnej sálavej plochy	[kW . m ⁻²]
q_v	- objemové zaťaženie spaľovacej komory	[kW . m ⁻³]
Q_v	- teplo privedené zo vzduchu	[kJ . kg ⁻¹]
$Q_{\text{výp}}$	- tepelný výkon výparníka	[kW]
$Q_{\text{výp}}^{\text{s}}$	- súčtový výkon výparníka	[kW]
Q_{vys}	- teplo odobrané výsypkou spalínám	[kW]
Q_{vyr}	- výrobné teplo pary	[kJ . kg ⁻¹]
$Q_{\text{vyr}}^{\text{s}}$	- súčtový výkon kotla	[kW]
Q_{zr}	- tepelný výkon závesných rúr	[kW]
s	- efektívna sálavá hrúbka	[m]
	- entropia	[kJ . K ⁻¹ . kg ⁻¹]
s_1	- pričný rozstup rúr	[m]

s_2	- pozdĺžny rozstup rúr	[m]
S	- plocha	[m ²]
S^r	- obsah síry v surovom palive	[%]
S_o	- prierez ohniska	[m ²]
S_{proj}	- projekčná plocha	[m ²]
$S_{ús}$	- účinná sálavá výhrevná plocha	[m ²]
S_{tr}	- priečna plocha zväzku	[m ²]
t_1	- teplota na vstupe	[° C]
t_{12}	- teplota ohrievanej vody na vstupe do výmenníka	[° C]
t_2	- teplota na výstupe	[° C]
t_{21}	- teplota ohrievanej vody na výstupe z výmenníka	[° C]
t_4	- teplota pary na vstupe do turbíny	[° C]
t_5	- teplota pary na výstupe z turbíny	[° C]
t_a	- teplota mäknutia popola	[° C]
t_k	- teplota spalín na výstupe z kotla	[° C]
t_{mr}	- teplota spalín na výstupe z mreže	[° C]
t_{np}	- teplota nechladeného plameňa	[° C]
t_{nv}	- teplota napájacej vody	[° C]
t_{ok}	- teplota spalín na výstupe z ohniska	[° C]
t_p	- teplota pary na výstupe z výparníka	[° C]
t_{pstr}	- stredná teplota pary	[° C]
t_{pp1}	- teplota pary za prehrievačom pary 1	[° C]
t_{pp2}	- teplota pary za prehrievačom pary 2	[° C]
t_{pv}	- teplota paliva	[° C]
t_s	- teplota spalín	[° C]

t_s^{in}	- teplota spalín na vstupe	[° C]
t_s^{out}	- teplota spalín na výstupe	[° C]
t_{str}	- stredná teplota	[° C]
t_{syt}	- teplota sýtosti	[° C]
t_{vEKO}	- teplota vody na výstupe z ohrievača vody	[° C]
t_{vz}	- teplota vzduchu	[° C]
t_{vzin}	- teplota vzduchu na vstupe	[° C]
t_{vzout}	- teplota vzduchu na výstupe	[° C]
t_{za}	- teplota zaneseného povrchu rúr	[° C]
t_{zr}	- teplota pary na výstupe zo závesných rúr	[° C]
V_o	- objem ohniska	[m ³]
V_s	- objemový prietok spalín	[Nm ³ . s ⁻¹]
w^f	- obsah vody v surovom palive	[%]
w_s	- rýchlosť spalín	[m . s ⁻¹]
x_{pl}	- poloha maximálnej teploty plameňa	[-]
z_1	- počet rúr v rade	[-]
z_2	- počet radov rúr	[-]
α	- prebytok vzduchu	[-]
α_k	- súčiniteľ prestupu tepla konvekciou	[W . m ⁻¹ . K ⁻¹]
α_s	- celkový súčiniteľ prestupu tepla	[W . m ⁻¹ . K ⁻¹]
α_{sal}	- súčiniteľ prestupu tepla sálaním	[W . m ⁻¹ . K ⁻¹]
β^1_{ovz}	- stredný súčiniteľ prebytku vzduchu	[-]
Δ_b	- bilančná odchýlka	[%]
Δp_{EKO}	- tlaková strata ekonomizéra	[MPa]
Δp_{PP1}	- tlaková strata prehrievača pary 1	[MPa]

Δp_{PP2}	- tlaková strata prehrievača pary 2	[MPa]
Δp_{PP3}	- tlaková strata prehrievača pary 3	[MPa]
$\Delta p_{výp}$	- tlaková strata výparníka	[MPa]
Δp_{zr}	- tlaková strata závesných rúr	[MPa]
ΔQ	- odchýlka tepla	[kW]
Δt	- rozdiel teplôt	[° C]
Δt_{ln}	- logaritmický priemer teplôt	[° C]
Δt_{str}	- aritmetický priemer teplôt	[° C]
ε	- súčiniteľ zanesenia	[m ² . K . W ⁻¹]
ζ	- tepelná strata	[%]
ζ_c	- strata horľavinou v tuhých zvyškoch	[%]
ζ_{CO}	- strata horľavinou v spalínach	[%]
ζ_{EKO}	- tepelná strata ohrievača vody	[%]
ζ_{fi}	- strata fyzickým teplom tuhých zvyškov	[%]
ζ_k	- strata citelným teplom spalín	[%]
ζ_{OVZ}	- tepelná strata ohrievača vzduchu	[%]
ζ_{PP1}	- tepelná strata prehrievača pary 1	[%]
ζ_{PP2}	- tepelná strata prehrievača pary 2	[%]
ζ_{PP3}	- tepelná strata prehrievača pary 3	[%]
ζ_{SV}	- strata výmenou tepla do okolia	[%]
η_{dr}	- účinnosť dohorievacieho roštu	[%]
η_G	- účinnosť generátora	[%]
η_m	- mechanická účinnosť	[%]
η_k	- účinnosť kotla	[%]
η_p	- dynamická viskozita pary	[Pa . s ⁻¹]

λ_s	- súčiniteľ tepelnej vodivosti spalín	[W . m ⁻¹ . K ⁻¹]
μ_{pk}	- koncentrácia popolčeka	[kg . kg ⁻¹]
v_{in}	- špecifický objem na vstupe	[m ³ . kg ⁻¹]
v_{out}	- špecifický objem na výstupe	[m ³ . kg ⁻¹]
v_p	- stredný špecifický objem pary	[m ³ . kg ⁻¹]
v_v	- stredný špecifický objem vody	[m ³ . kg ⁻¹]
ν_s	- kinematická viskozita	[m ² . s ⁻¹]
ξ_o	- súčiniteľ zanesenia stien ohniska	[-]
$\sigma_{ač}$	- súčiniteľ sálania absolútneho čierneho telesa	[-]
φ	- súčiniteľ zachovania tepla	[%]
φ_{os}	- súčiniteľ osálenia plochy	[%]
φ_v	- vlhkosť vzduchu	[%]
χ_v	- podiel vodnej pary na 1 m _N ³ vzduchu	[-]
ψ	- súčiniteľ tepelnej efektívnosti	[-]
ω	- súčiniteľ omývania	[-]
ω_{Ar}	- koncentrácia argónu	[%]
ω_c	- celkový pomerný objem vodných pár a trojatom. plynov	[%]
ω_{CO_2}	- koncentrácia oxidu uhličitého	[%]
ω_{H_2O}	- koncentrácia vodnej pary	[%]
ω_{N_2}	- koncentrácia dusíka	[%]
ω_{O_2}	- koncentrácia kyslíka	[%]
ω_{SO_2}	- koncentrácia oxidu siričitého	[%]

Úvod

V súčasnosti je využívané len malé percento z celkového množstva dostupnej biomasy. Cieľom predkladanej diplomovej práce je poukázať na možnosti jej využitia prostredníctvom návrhu konkrétneho parného kotla na biomasu.

V prvej časti diplomovej práce sú podrobnejšie rozobrané spôsoby využívania biomasy na energetické účely a popis daných zariadení, najmä spaľovacích zariadení.

Nasledujúca časť diplomovej práce obsahuje návrh obehu parnej turbíny s kotlom na biomasu podľa zadaných hodnôt. Návrh spočíva vo výpočte prevádzkových parametrov parného obehu.

Hlavná časť diplomovej práce pozostáva zo stochiometrických výpočtov spaľovania a následného konštrukčného a dispozičného návrhu parného kotla na biomasu. Parný kotol s výkonom 22 t/h, teplotou pary 420 °C a tlakom 8 MPa je určený na spaľovanie biomasy vo forme drevnej štiepky s dolnou výhrevnosťou garančného paliva 9 MJ/kg.

Roštový parný kotol je podopretej koncepcie s prirodzenou cirkuláciou. Vlastný tlakový systém tvorí päť spalínových ťahov. Prvý ťah kotla tvorí ohnisko, kde v spodnej časti je vzduchom chladený mechanický pásový rošt. Druhý ťah je prázdny a slúži na vychladenie spalín. V treťom ťahu sú po prúde spalín umiestnené tri zväzky prehrievača pary (PR3, PR2 a PR1). Steny prvého až tretieho ťahu sú membránové. V štvrtom ťahu, tvorenom plechovým kanálom, sú umiestnené dva bloky ohrievača vody (EKO) a dva bloky rúrkového ohrievača vzduchu (OVZ). V poslednom piatom ťahu je umiestnených päť zväzkov rúrkového ohrievača vzduchu.

Vlastné spaľovanie paliva prebieha čiastočne vo vrstve a vo vznose na mechanickom pásovom rošte s pneumatickým pohadzovaním paliva. Oblasť prívodu paliva a odvodu trosky bude chránená výmurovkou.

Spaľovací primárny vzduch bude ohrievaný rúrkovým ohrievačom vzduchu postupne cez sedem blokov a bude privádzaný pod rošt. Sekundárny vzduch je zaústený do zadnej a do prednej steny spaľovacej komory.

Vytvorené spaliny zo spaľovania drevnej štiepky prúdia cez jednotlivé ťahy kotla.

Za prehrievačom pary PR1 na výstupe z tretieho ťahu je nainštalované prevádzkové meranie O₂ a CO.

Na výstupe z kotla prúdia spaliny do mechanického odlučovača a tkanivového filtra, kde dochádza k odlúčeniu častíc popolčeka. Následne sú spaliny spalínovým ventilátorom nasávané do oceľového komína.

Napájacia voda z napájacej nádrže s odplyňovačom je pomocou napájacích čerpadiel dopravená cez regulačný ventil napájania do vstupnej komory ohrievača vody.

Termický odplyňovač je určený na zníženie obsahu nekondenzujúcich plynov v napájacej vode a na dosiahnutie predpísaného obsahu kyslíka v napájacej vode.

Ohriata napájacia voda z ohrievača vody vstupuje do kotlového telesa.

Kotlové teleso je vybavené priamymi a diaľkovými vodoznakmi. Kotlová voda cirkuluje vo výparníkovom systéme, kde sa mení na sýtu paru, ktorá potom postupuje cez rúrky sýtej pary a potrubia sýtej pary do vstupnej komory prehrievača pary. Regulácia teploty prehriatej pary medzi jednotlivými stupňami prehrievača pary je regulovaná vstrekom napájacej vody odoberanej pred napájacou hlavou.

Tlakový systém kotla je vybavený potrebnými armatúrami a meracími prístrojmi zabezpečujúcimi jeho bezpečnú a spoľahlivú prevádzku.

Kotol bude vybavený dvomi pružinovými poistnými ventilmi zabezpečujúcimi tlakový systém kotla pred prekročením dovoleného tlaku. Jeden poistný ventil bude umiestnený na kotlovom telese, druhý na výstupnom potrubí prehriatej pary. Kotol má tlmič hluku, do ktorého sú zaústené výfuky z poistných ventilov ako aj potrubie slúžiace na nábeh kotla.

Na stabilizáciu horenia bude použitý zemný plyn, ktorý bude spaľovaný v nízkoemisnom monoblokovom horáku.

Konvenčné plochy kotla (prehrievač pary, ohrievač vody, rúrkový ohrievač vzduchu) budú kontinuálne čistené od nánosov parnými ofukovačmi. Na čistenie systému prehrievačov v treťom ťahu budú použité parné ofukovače taktiež pre ohrievač vzduchu a ohrievač vody vo štvrtom ťahu budú použité parné ofukovače.

Steny kotla, potrubia pary a napájacej vody a spalínovody budú zaizolované a oplechované pozinkovaným plechom.

Troska zo spaľovania na rošte je odvádzaná v prednej časti spaľovacej komory cez mokrý vynášač trosky do kontajneru. Prepad roštu je dopravený do mokrého vynášača trosky. Popolček z výsypky pod druhým a tretím ťahom je dopravený do mokrého vynášača trosky. Z výsypky pod štvrtým a piatym ťahom sa popolček dopraví cez suché odpopolnenie prostredníctvom závitovkového dopravníka do kontajnera.

V závere diplomovej práce sú následne zhrnuté variabilné náklady okruhu parného kotla na biomasu v zapojení s parnou protitlakou turbínou.

1 Spôsoby využitia biomasy na energetické účely

Možnosti využitia biomasy na energetické účely predurčujú hlavne jej fyzikálne a chemické vlastnosti. Veľmi dôležitým parametrom je vlhkosť, resp. obsah sušiny v biomase. Hodnotu 50 % sušiny je možné považovať za hraničnú medzi procesmi mokrými (obsah sušiny je menší ako 50 %) a suchými (obsah sušiny je vyšší ako 50 %). Podľa princípu samotnej konverzie energie je možné definovať niekoľko spôsobov získavania energie z biomasy:

- termochemická premena biomasy (suché procesy):
 - spaľovanie
 - splyňovanie
 - pyrolýza
- biochemická premena biomasy (mokrý procesy):
 - alkoholické kvasenie
 - metánové kvasenie
- fyzikálna a chemická premena biomasy:
 - mechanická (štiepenie, drvenie, lisovanie, briketovanie, peletovanie, mletie atď.)
 - chemická (esterifikácia surových rastlinných olejov)
 - získavanie odpadového tepla pri spracovávaní biomasy (napríklad pri kompostovaní, aeróbnom čistení vôd, anaeróbnej fermentácii a pod.).

Existuje teda viacero spôsobov využitia biomasy na energetické účely, v praxi prevládajú pri suchých procesoch rôzne formy spaľovania, pri mokrých procesoch výroba bioplynu anaeróbnou fermentáciou. Z ostatných spôsobov najmä výroba metylesteru z bioolejov. [10]

Tab. 1.1 Spôsoby konverzie biomasy na energiu

Typ konverzie biomasy	Spôsob konverzie biomasy	Energetický výstup	Odpadový materiál alebo druhotná surovina
Termochemická konverzia (suché procesy)	Spaľovanie	Teplo viazané na nosič	Popol
	Splyňovanie	Generátorový plyn	Dechtový olej, uhľikaté palivo
	Pyrolýza	Generátorový plyn	Dechtový olej, pevné horľavé zvyšky
Biochemická konverzia (mokrý procesy)	Anaeróbna fermentácia	Bioplyn	Fermentovaný substrát
	Aeróbna fermentácia	Teplo viazané na nosič	Fermentovaný substrát
Fyzikálno-chemická konverzia	Esterifikácia bioolejov	Metylester, biooleje	Glycerín

1.1 Spaľovanie biomasy

Technológia priameho spaľovania biomasy je najbežnejším spôsobom jej energetického využitia. Je to metóda v praxi overená a komerčne dostupná na vysokej úrovni. Spaľovacie zariadenia sa dodávajú v rôznych vyhotoveniach a výkonoch, pričom sú schopné spaľovať prakticky akékoľvek palivo od dreva cez baly slamy až po slepačí trus alebo komunálny odpad. Význam má predovšetkým spaľovanie odpadového dreva a odpadov z poľnohospodárskej produkcie (slama). Vznikajúce teplo sa využíva na vykurovanie, v technologických procesoch (procesné teplo) alebo na výrobu elektrickej energie. Spaľovací proces v dreve prebieha v nasledujúcich fázach:

- voda vo vnútri dreva začne vriť (aj veľmi staré a relatívne suché drevo obsahuje až 15 % vody vo svojich bunkových štruktúrach)
- z dreva sa postupne uvoľňuje plyn, pričom pre správne spaľovanie je potrebné, aby tento plyn horel a neunikal do komína
- vznikajúci plyn sa mieša s atmosférickým vzduchom a horí pri vysokej teplote zvyšok dreva (zväčša uhlík) horí tiež, pričom ako odpad vzniká popol

Pre účinné spaľovanie je potrebné zabezpečiť:

- dostatočne vysokú teplotu
- dostatok vzduchu
- dostatok času, aby mohlo prebehnúť úplné spálenie biomasy

Ak pri horení nie je zabezpečený prívod dostatočného množstva vzduchu, horenie je neúplné a vznikajúci dym obsahujúci nespálený uhlík je čierny. Tento proces je sprevádzaný aj charakteristickým zápachom a značným množstvom usadenín v komíne, ktoré môžu hroziť opätovným zapálením. Na druhej strane, ak je pri horení veľké množstvo vzduchu, klesá teplota a plyny unikajú z dreva nespálené, pričom dochádza k úniku aj užitočnej energie. Správne množstvo vzduchu je preto kritické pre zabezpečenie dokonalého horenia. Výsledkom je neprítomnosť dymu a zápachu. Regulácia prívodu vzduchu zväčša závisí od použitého komína a cesty, ktorou sa vzduch do miesta spaľovania dostáva.

Hoci priame spaľovanie je najjednoduchšou a najbežnejšou metódou využitia energie biomasy, nie vždy je to účinný proces. Príkladom môže byť zohriatie vody nad ohňom. Energia obsiahnutá v 1 m³ suchého dreva je asi 10 GJ. Na zvýšenie teploty jedného litra vody o jeden stupeň je potrebných 4,2 kJ tepla. Na zovretie litra vody by preto malo postačiť asi 400 kJ, čo zodpovedá približne 40 cm³ dreva. V praxi však pri otvorenom ohni

potrebujeme oveľa viac dreva často až 50-krát viac, čo znamená, že účinnosť spaľovacieho procesu pri otvorenom ohni je asi 2 %. Súvisí to s tým, že väčšia časť energie dreva uniká bez úžitku. Návrh spaľovacieho kotla, ktorý by mal podstatne vyššiu účinnosť, si preto vyžaduje pochopenie celého spaľovacieho procesu. Dôležitým krokom je poznanie procesu odparovania vody z dreva, teda procesu, ktorý energiu spotrebováva. Spotrebovaná energia však predstavuje len malé percento z celkovej využiteľnej energie.

Moderné spaľovacie systémy sú veľmi podobné tým, ktoré sa využívajú na spaľovanie uhlia a vyznačujú sa účinnosťou spaľovania až 90 %. [10]

1.2 Konštrukčné riešenie kotla na spaľovanie biomasy

Ohnisko parného kotla na spaľovanie biomasy je hlavnou súčasťou spaľovacieho zariadenia. Okrem ohniska s roštom alebo horákov sú ďalšími súčasťami pomocné zariadenia, ako napríklad príprava a dávkovanie paliva, zariadenia pre dopravu a ohrev spaľovacieho vzduchu, dopravu spalín kotlom, odstraňovanie tuhých zvyškov po spaľovaní.

Podľa druhov spaľovaného paliva sa ohniská delia na ohnisko k spaľovaniu tuhých palív, kvapalných palív a plyných, prípadne kombinované k spaľovaniu rôznych fáz. Ohniská na pevné palivá sú podľa spôsobu spaľovania rozdelené na práškové, kde sa palivo spaľuje vo forme prášku za letu priestorom ohniska, cyklónové ohniská, kde sa palivo spaľuje vo forme drviva alebo prášku za intenzívneho vírenia v priestore, fluidné ohniská pre spaľovanie drveného a kusového paliva vo vznose vo fluidnej vrstve o roštové ohniská pre spaľovanie tuhého paliva v kľudovej vrstve na rošte. [7]

1.2.1 Fluidné ohnisko

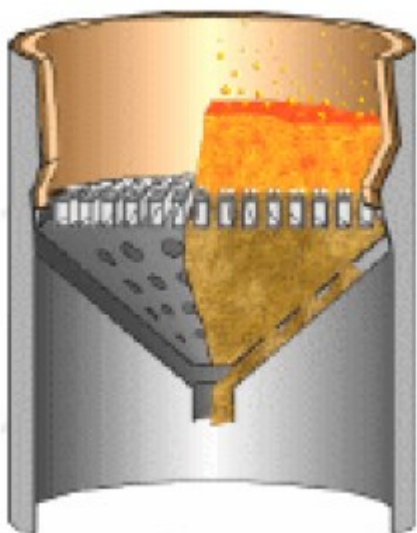
Vo fluidnom ohnisku sa spaľuje drvené palivo v kypiacej fluidnej vrstve. Spaľované častice sú uvedené do fluidizácie spaľovacím vzduchom a vo fluidnej vrstve dochádza k intenzívnemu kinetickému horeniu. Rovnováha síl pôsobiacich na častici pri spaľovaní palív rôznych veľkostí zŕn je zaistená znížením rýchlosti fluidizačnej tekutiny (vzduchu, spalín), ktoré sa dosiahne zväčšením prierezu po výške vrstvy. Dochádza taktiež k rozvrstveniu paliva podľa zrnitosti a dlhému zotrvaniu v kypiacej vrstve až k dokonalému vyhoreniu. Princíp ohniska je na obrázku 1.1, na obrázku 1.2 je príklad konštrukcie fluidného ohniska.

Tieto ohniská sú vhodné k spaľovaniu menejhodnotných palív vrátane odpadu z biomasy. Je možné čiastočne spaľovať aj kvapalné palivá. Vo fluidnej vrstve sa udržiava pomerne nízka teplota spaľovania 700 – 900 °C, čo vedie k nižšej tvorbe emisií NO_x. Palivo s vyšším obsahom prchavej horľaviny sa môže spaľovať dvojstupňovo. Vo fluidnej vrstve môžu byť umiestnené výhrevné plochy a dochádza tam k intenzívnemu preštupu tepla.

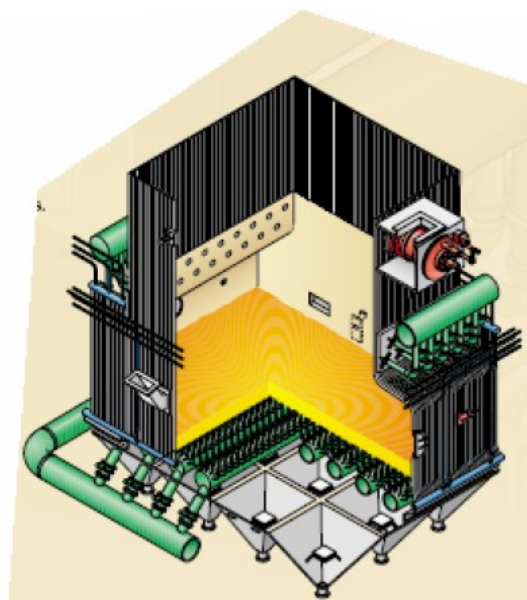
Musia však byť vyrobené z hľadiska korózie z austenitických ocelí. Do paliva bývajú často dávkané aditíva k chemickému zachyteniu nebezpečných emisií.

Hlavnou nevýhodou fluidných ohnísk je značná zložitosť a náročnosť na obsluhu a údržbu. Pre malé kotly sú cena zariadenia a prevádzkové náklady väčšinou neúnosné a dáva sa prednosť spaľovaniu na rošte. U veľkých prierezoch a výkonoch je náročné udržať vo fluidnej vrstve rovnomerný prietok vzduchu a dokonalé spaľovanie. Rieši sa to rozdelením ohníska na niekoľko samostatných segmentov (podľa počtu výsypiek), ako je viditeľné na obrázku 1.2. Konštrukcia je však ešte zložitejšia a náročnejšia na obsluhu. Problémom taktiež býva zvýšený únos nespálených drobných častíc paliva so vzduchom a zvýšia sa straty mechanickým nedopalom. Čiastočne sa môže dosiahnuť zlepšenie recirkuláciou odlúčeného popolčeka. Aby sa fluidná vrstva vychladila na požadovanú teplotu 700 až 900 °C, musia v nej byť zapojené teplovýmenné plochy, ktoré sú zapojené ako výparník. [7]

Obr. 1.1 Princíp fluidného ohníska



Obr. 1.2 Príklad konštrukcie fluidného ohníska



1.2.2 Roštové ohnisko

Roštové ohniská sú najstarším typom priemyslového ohníska. Sú určené k spaľovaniu kusových palív filtračným spôsobom v horiacej vrstve. Pri prechádzaní vzduchu horiacou vrstvou dochádza k intenzívnemu kinetickému spaľovaniu, uvoľnená prchavá horľavina dohorieva v priestore spaľovacej komory a drobné čiastočky horia vo vznose prúdu spalín a vzduchu.

Rošt má plniť pri spaľovaní tieto základné funkcie:

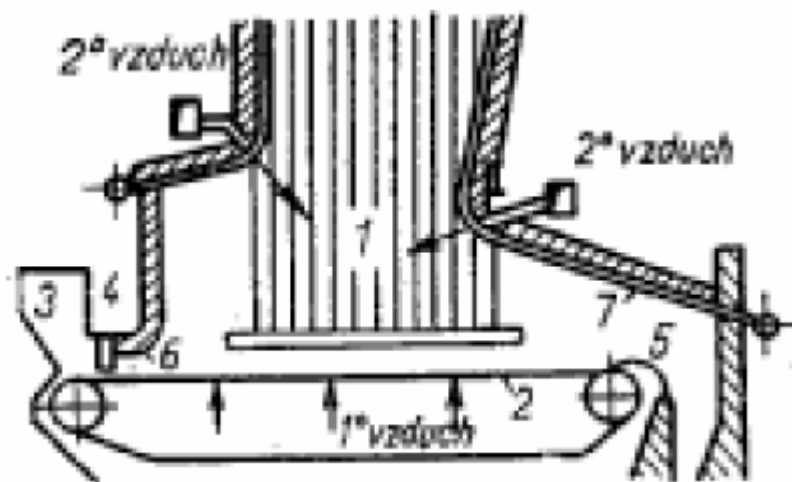
- podopierať palivo
- zaistiť prívod spaľovacieho vzduchu do jednotlivých miest

- umožniť vysušenie paliva, zahriatie a zapálenie, horenie a dokonalé vyhorenie
- zhromažďovať tuhé zvyšky, prípadne zaistiť ich odvod
- umožniť reguláciu výkonu

Storočia vývoja roštových ohnísk sa odzrkadlili v celom rade rôznych konštrukcií a princípov ktoré viedli k veľkej univerzálnosti. Je na nich možné spaľovať širokú škálu tuhých palív od zrnitých s veľkým prachovým podielom cez kusové palivá až po spaľovanie veľkých predmetov ako sú polená. Sú spáliteľné aj menejhodnotné palivá rôznych vlastností a odpady. Spaľovanie v roštových ohniskách je najrozšírenejší spôsob energetického využitia biomasy.

Roštové ohniská sú obmedzené veľkosťou, pri výkonoch nad 50 MW je plocha už značne veľká a musí sa venovať veľká pozornosť zaisteniu jej spoľahlivosti a účinnej kontrole spaľovania. Zvyšovanie vrstvy paliva je obmedzené jeho priedušnosťou. Pre spaľovanie je taktiež nutný väčší prebytok vzduchu a tým rastie komínová strata. Mechanické rošty sú pomerne zložité a ťažké, ale moderné konštrukcie sú nenáročné na obsluhu a údržbu. Pri intenzívnom spaľovaní sú povrchy roštov značne opotrebované žiarom. Z tohto dôvodu sú vyrábané zo žiaruvzdorných materiálov, musia byť chladené v najexponovanejších miestach spaľovacím vzduchom a zakryté vrstvou paliva. Pre kotly malých a stredných výkonov je ale ich použitie najvýhodnejšie. [7]

Obr. 1.3 Hlavné časti roštového ohníska



1 – spaľovacia komora, 2 – rošt, 3 – násypka, 4 – hradítko,
5 – škvárový žľab, 6, 7 – predná a zadná klemba

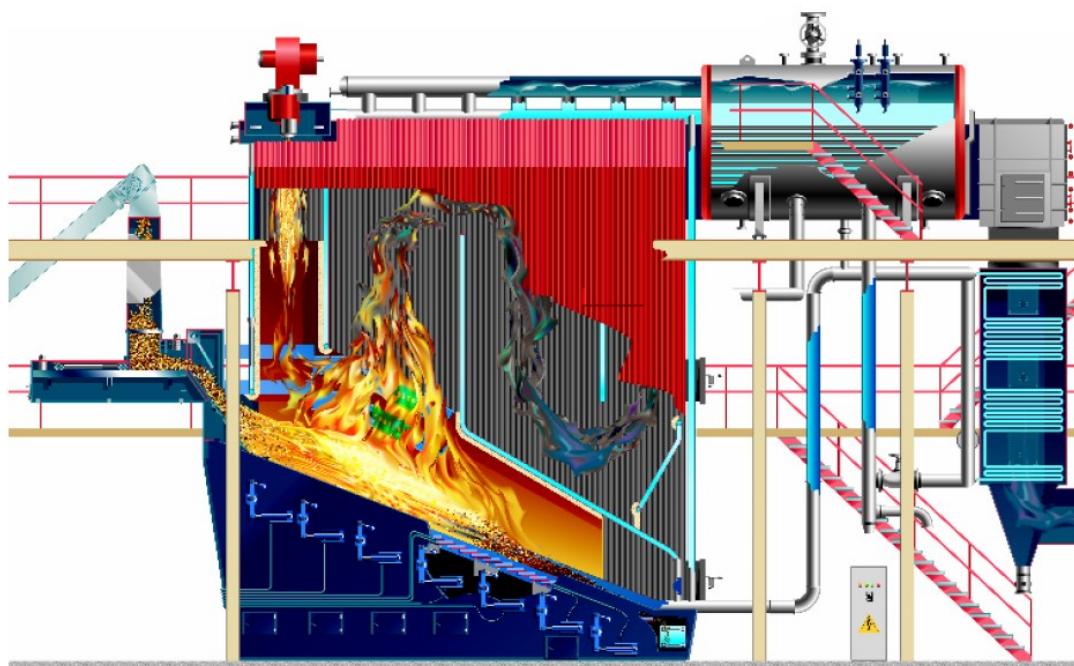
1.2.3 Kombinované ohnisko

Kombinované ohniská sú určené pre spaľovanie niekoľko druhov prípadne skupenstiev palív. Najčastejšie sú to ohniská na pevné palivá všeobecne s prídavnými horákmi na plyn a ľahké oleje alebo roštové ohniská s prídavným spaľovaním prachového paliva. Horák je

umiestnený v stenách spaľovacej komory a musí tomu byť prispôsobený jej tvar a rozvod vzduchu. Príklad kombinovaného kotla pre spaľovanie drevného odpadu na rošte s prídavným horákom na spaľovanie plynu je na obrázku 1.4.

Kombinované ohniská sa používajú z rôznych dôvodov. Pre spaľovanie odpadov a menejhodnotných palív prípadne palív s vysokou vlhkosťou sú nutné stabilizačné horáky, pretože výhrevnosť a vlastnosti paliva sa značne menia. Často je týmto spôsobom zvyšovaný menovitý výkon, či už z dôvodu dosiahnutia medznej veľkosti roštového kúreniska alebo nedostatku biomasy pre dosiahnutie požadovaného výkonu. Výnimkou nie je ani snaha zaistiť pomocou prídavných horákov trvalú prevádzku pri nerovnomernej dodávke základného paliva. Občas je potrebné zaistiť spaľovanie prachového podielu v roštových ohniskách, kde zdroj prachu je relatívne malý a nerovnomerný teda sa neoplatí inštalovať samostatný kotol. Ohnisko so zapalovacími horákmi sa nepovažuje za kombinované.

Obr. 1.4 Kotol s kombinovaným roštovým ohniskom a plynovým horákom



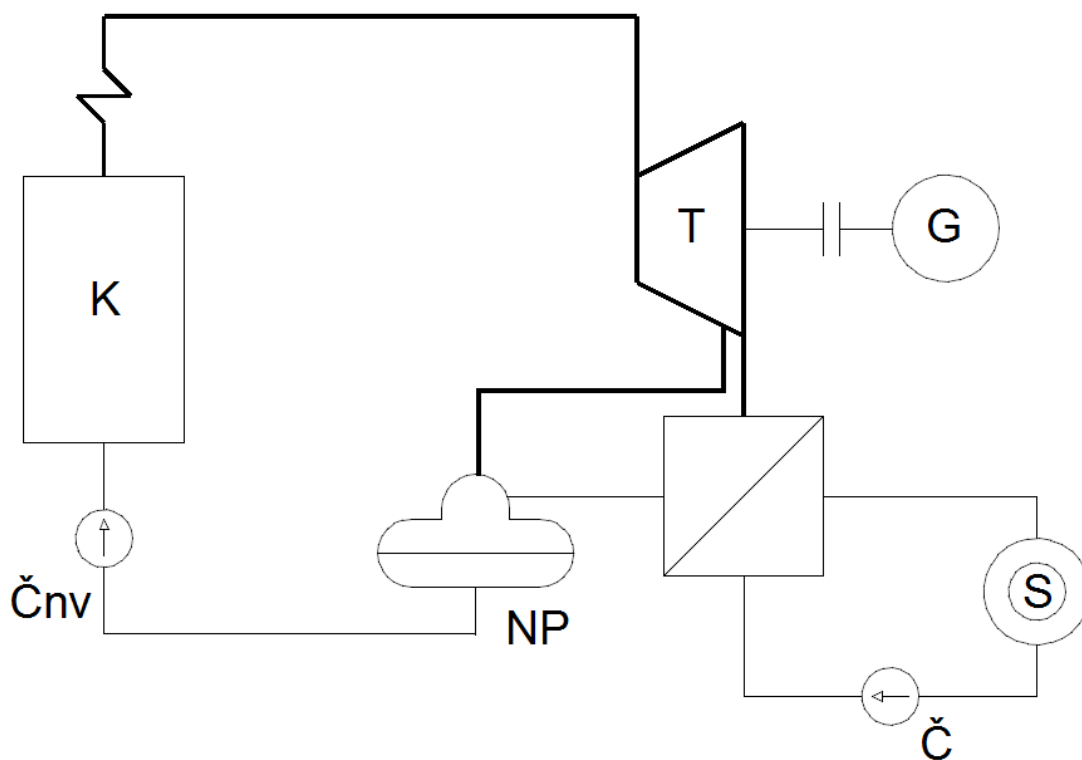
Biomasa je spaľovaná na mechanickom vodou chladenom rošte v zamurovanej spaľovacej komore. Pri prednej stene je umiestnený plynový horák, ktorý podporuje spaľovanie, vysušanie a zapálenie mokrého paliva. Spaliny ďalej prechádzajú vodorúrkovým, tzv. radiačným výmenníkom s chladenými membránovými stenami a so systémom medziťahov, ktoré predlžujú cestu spalín, kde dochádza k dokonalému vyhoreniu horľaviny a tuhých častíc, teda odovzdaniu tepelnej energie prevažne sálaním alebo radiáciou. Pri zadnej stene vstupujú spaliny do žiarobetónového výmenníka, tzv. konvenčnej časti a potom prechádzajú cez ekonomizéry do odlučovačov a do komína. Konvenčná časť slúži súčasne ako bubon pre separáciu, čistenie pary a dopĺňovanie vody do vodného obehu kotla. [7]

2 Bilančný výpočet celého okruhu

2.1 Zadané hodnoty

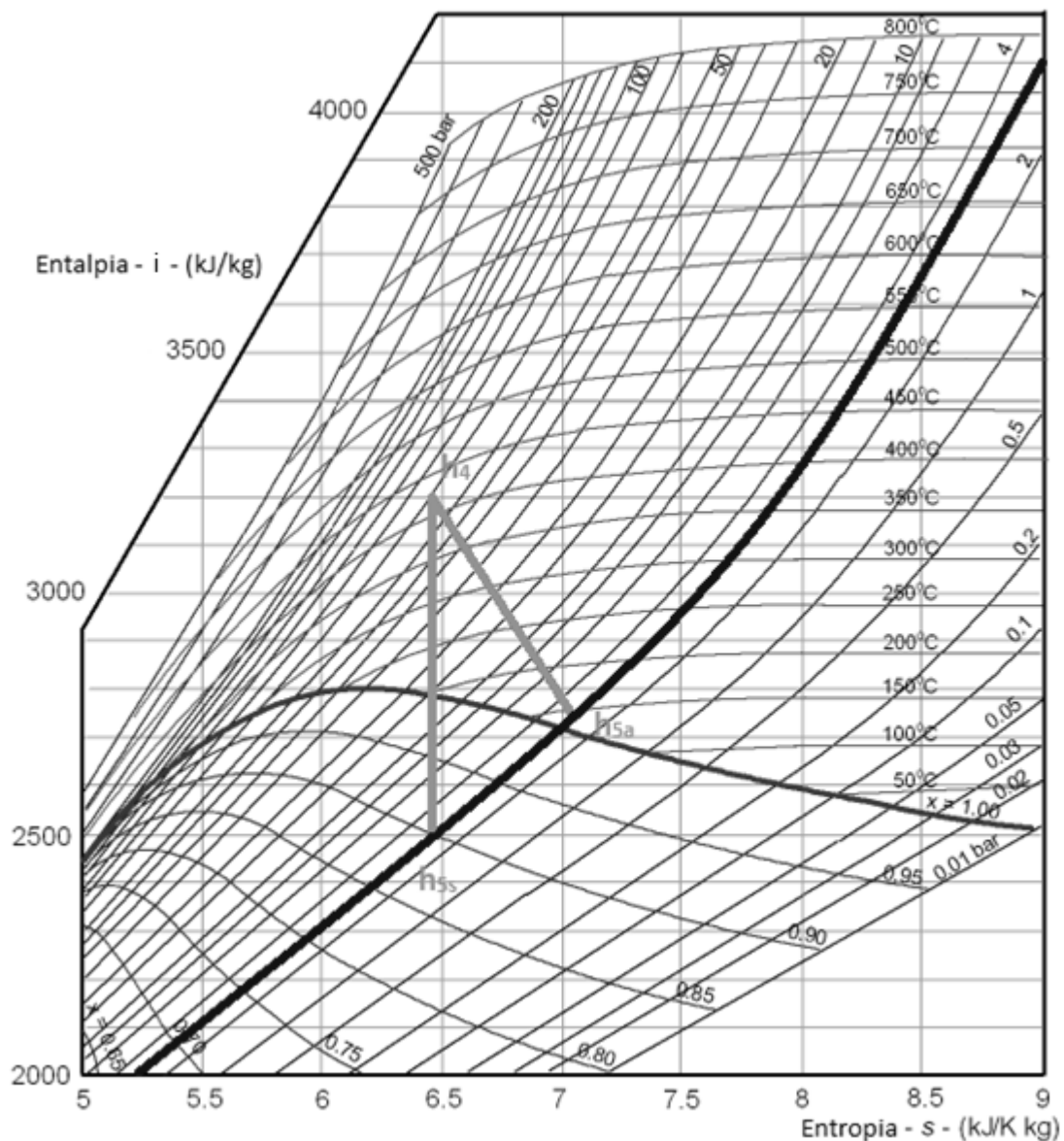
Elektrický výkon na svorkách generátora	$P_{el} = 2,5 \text{ MW}$
Teplota pary na vstupe do turbíny	$t_4 = 420 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Tlak pary na vstupe do turbíny	$p_4 = 8 \text{ MPa}$
Účinnosť parnej turbíny	87 %
Účinnosť mechanická	92 %
Účinnosť generátora	96 %
Teplota pary na výstupe z turbíny	$t_5 = 140 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Výhrevnosť drevnej štiepky	9 MJ/kg
Teplota ohrievanej vody na vstupe do výmenníka	$t_{21} = 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Teplota ohrievanej vody na výstupe z výmenníka	$t_{22} = 110 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Obr. 2.1 Jednoduchá schéma teplárne



2.2 Výpočet

Obr. 2.2 Expanzná krivka turbíny



Spotreba pary pre turbínu:

$$M_p = \frac{P_{el}}{(i_4 - i_{5a}) \eta_m \eta_G} \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2.1)$$

$$M_p = \frac{2500}{(3194 - 2733) \cdot 0,92 \cdot 0,97}$$

$$M_p = 6,076 \text{ t} \cdot \text{hod}^{-1}$$

kde:

h_4 a h_{5a} sú určené z entalpických tabuliek.

Výkon odplyňovača:

$$P_{\text{odp}} = M_p \cdot (i_{nv} - i_{120}) \text{ [kW]} \quad (2.2)$$

$$P_{\text{odp}} = 6,076 \cdot (670 - 503)$$

$$P_{\text{odp}} = 1014 \text{ kW}$$

Množstvo pary pre odplyňovač:

$$M_{\text{podp}} = \frac{P_{\text{odp}}}{(i_{\text{odp}} - i_{nv})} \text{ [t} \cdot \text{hod}^{-1}] \quad (2.3)$$

$$M_{\text{podp}} = \frac{1014}{(2755 - 670)}$$

$$M_{\text{podp}} = 0,486 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Výmenník tepla:

Ak sa teplota médií v smere výmennej plochy mení relatívne viac, t.j. ak platí, že $0,5 > (\Delta t_1 / \Delta t_2) > 2$ môžeme Δt_{str} určiť ako stredný logaritmický rozdiel.

$$\Delta t_{\text{ln}} = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln(\Delta t_2 / \Delta t_1)} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (2.4)$$

$$\Delta t_{\text{ln}} = \frac{70 - 30}{\ln(70 / 30)}$$

$$\Delta t_{\text{ln}} = 47,208 \text{ }^\circ\text{C}$$

Matematické vyjadrenie rovnice tepelnej bilancie súvisí s druhom použitých teplotných látok. Pri kondenzácii sýtej pary je: [5]

$$\dot{Q} = M_p \cdot (h_{5a} - h_{140}) \text{ [kJ]} \quad (2.5)$$

$$\dot{Q} = 6,076 \cdot (2733 - 589)$$

$$\dot{Q} = 13026,944 \text{ kJ}$$

Tepelný tok prechodom tepla cez deliacu stenu výmenníka tepla:

$$\dot{Q} = k \cdot S \cdot \Delta t_{\text{ln}} \text{ [kJ]} \quad (2.6)$$

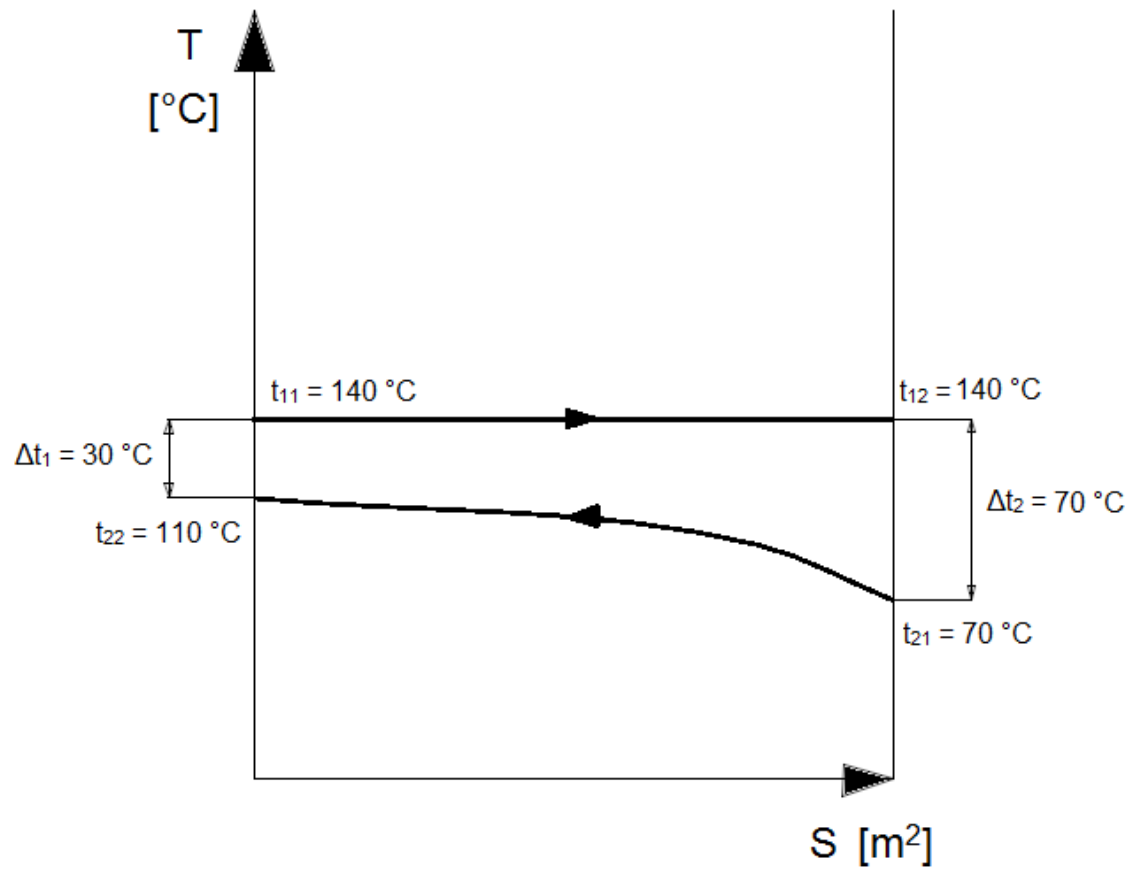
odkiaľ vyjadríme plochu S ako:

$$S = \frac{\dot{Q}}{k \cdot \Delta t_{\text{ln}}} \text{ [m}^2\text{]} \quad (2.7)$$

$$S = \frac{13026,944}{1,9 \cdot 47,208}$$

$$S = 145,23 \text{ m}^2$$

Obr. 2.3 Diagram výmenníka tepla



Za tepelný výmenník bude zaradený dochladzovač, ktorý zabezpečí dokonalú kondenzáciu pary znížením teploty na 120 °C .

3 Stechiometria spaľovania

3.1 Prvkový rozbor drevnej štiepky

w^r	45 %
A^r	1,05 %
H^r	3,16 %
C^r	28,68 %
S^r	0,04 %
N^r	0,26 %
O^r	21,81 %
Cl^r	0,005 %
Q_i^r	9000 kJ

3.2 Minimálne množstvá vzduchu a spalín

Minimálne množstvo kyslíka potrebného pre dokonalé spálenie paliva:

$$O_{O_2, \min} = \frac{22,39}{12,01} \cdot \frac{C^r}{100} + \frac{22,39}{4,032} \cdot \frac{H^r}{100} + \frac{22,39}{32,06} \cdot \frac{S^r}{100} - \frac{22,39}{32} \cdot \frac{O^r}{100} \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (3.1)$$

$$O_{O_2, \min} = \frac{22,39}{12,01} \cdot \frac{28,68}{100} + \frac{22,39}{4,032} \cdot \frac{3,16}{100} + \frac{22,39}{32,06} \cdot \frac{0,04}{100} - \frac{22,39}{32} \cdot \frac{21,81}{100}$$

$$O_{O_2, \min} = 0,557 \quad m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

Minimálne množstvo spaľovacieho vzduchu suchého:

$$O_{vz, \min}^s = \frac{O_{O_2, \min}}{0,21} \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (3.2)$$

$$O_{vz, \min}^s = \frac{0,557}{0,21}$$

$$O_{vz, \min}^s = 2,656 \quad m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

Minimálne množstvo spaľovacieho vzduchu vlhkého:

Pri konštrukčných výpočtoch pre bežné klimatické podmienky je možné zvoliť veľkosť $\chi_v = 1,016$ odpovedajúcu približne relatívnej vlhkosti $\phi_v = 70 \%$ pri teplote $t_{vz} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$O_{vz, \min}^v = O_{vz, \min}^s \cdot \chi_v \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (3.3)$$

$$O_{vz, \min}^v = 2,656 \cdot 1,016$$

$$O_{vz, \min}^v = 2,698 \quad m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

Objem vodnej pary vo vzduchu:

$$O_{H_2O}^v = O_{vz, \min}^v - O_{vz, \min}^s \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (3.4)$$

$$O_{H_2O}^v = 2,698 - 2,656$$

$$O_{H_2O}^v = 0,042 \quad m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

Minimálne množstvo suchých spalín:

$$O_{sp, min}^s = \sum O_{CO_2} + O_{SO_2} + O_{N_2} + O_{Ar} \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (3.5)$$

$$O_{sp, min}^s = \sum 0,532 + 0,000273 + 2,075 + 0,024$$

$$O_{sp, min}^s = 2,631 \, m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

kde:

$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot \frac{C^r}{100} + 0,0003 \cdot O_{vz, min}^s \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (3.6)$$

$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot \frac{28,68}{100} + 0,0003 \cdot 2,656$$

$$O_{CO_2} = 0,532 \, m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

$$O_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot \frac{S^r}{100} \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (3.7)$$

$$O_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot \frac{0,04}{100}$$

$$O_{SO_2} = 0,000273 \, m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

$$O_{N_2} = \frac{22,4}{28,016} \cdot \frac{N^r}{100} + 0,7805 \cdot O_{vz, min}^s \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (3.8)$$

$$O_{N_2} = \frac{22,4}{28,016} \cdot \frac{0,26}{100} + 0,7805 \cdot 2,656$$

$$O_{N_2} = 2,075 \, m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

$$O_{Ar} = 0,0092 \cdot O_{vz, min}^s \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (3.9)$$

$$O_{Ar} = 0,0092 \cdot 2,656$$

$$O_{Ar} = 0,024 \, m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

Minimálny objem vodnej pary v spalínach:

$$O_{H_2O, min}^{sp} = \frac{22,4}{18,016} \cdot \frac{w^r}{100} + \frac{22,4}{2,016} \cdot \frac{H^r}{100} + (X_v - 1) \cdot O_{vz, min}^s \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (3.10)$$

$$O_{H_2O, min}^{sp} = \frac{22,4}{18,016} \cdot \frac{45}{100} + \frac{22,4}{2,016} \cdot \frac{3,16}{100} + (1,016 - 1) \cdot 2,656$$

$$O_{H_2O, min}^{sp} = 0,953 \, m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

Minimálne množstvo vlhkých spalín:

$$O_{sp, min}^v = O_{sp, min}^s + O_{H_2O, min} \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (3.11)$$

$$O_{sp, min}^v = 2,631 + 0,953$$

$$O_{sp, min}^v = 3,584 \, m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

Skutočné množstvo vlhkých spalín s prebytkom vzduchu $\alpha = 1,3$:

$$O_{sp}^v = O_{sp, min}^v + (\alpha - 1) \cdot O_{vz, min}^v [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (3.12)$$

$$O_{sp}^v = 3,584 + (1,3 - 1) \cdot 2,698$$

$$O_{sp}^v = 4,393 m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

3.3 Koncentrácia zložiek skutočných vlhkých spalín:

$$\omega_{CO_2} = \frac{O_{CO_2} + (\alpha - 1) \cdot 0,0003 \cdot O_{vz, min}^s}{O_{sp}} \cdot 100 [\%] \quad (3.13)$$

$$\omega_{CO_2} = \frac{0,532 + (1,3 - 1) \cdot 0,0003 \cdot 2,656}{4,393} \cdot 100$$

$$\omega_{CO_2} = 12,115 \%$$

$$\omega_{SO_2} = \frac{O_{SO_2}}{O_{sp}} \cdot 100 [\%] \quad (3.14)$$

$$\omega_{SO_2} = \frac{0,000273}{4,393} \cdot 100$$

$$\omega_{SO_2} = 0,00621 \%$$

$$\omega_{H_2O} = \frac{O_{H_2O} + (\alpha - 1) \cdot (X_v - 1) \cdot O_{vz, min}^s}{O_{sp}} \cdot 100 [\%] \quad (3.15)$$

$$\omega_{H_2O} = \frac{0,953 + (1,3 - 1) \cdot (1,016 - 1) \cdot 2,656}{4,393} \cdot 100$$

$$\omega_{H_2O} = 21,983 \%$$

$$\omega_{Ar} = \frac{O_{Ar} + (\alpha - 1) \cdot 0,0092 \cdot O_{vz, min}^s}{O_{sp}} \cdot 100 [\%] \quad (3.16)$$

$$\omega_{Ar} = \frac{0,024 + (1,3 - 1) \cdot 0,0092 \cdot 2,656}{4,393} \cdot 100$$

$$\omega_{Ar} = 0,713 \%$$

$$\omega_{O_2} = \frac{(\alpha - 1) \cdot 0,21 \cdot O_{vz, min}^s}{O_{sp}} \cdot 100 [\%] \quad (3.17)$$

$$\omega_{O_2} = \frac{(1,3 - 1) \cdot 0,21 \cdot 2,656}{4,393} \cdot 100$$

$$\omega_{O_2} = 3,808 \%$$

$$\omega_{N_2} = \frac{O_{N_2} + (\alpha - 1) \cdot 0,7805 \cdot O_{vz, min}^s}{O_{sp}} \cdot 100 [\%] \quad (3.18)$$

$$\omega_{N_2} = \frac{2,075 + (1,3 - 1) \cdot 0,7805 \cdot 2,656}{4,393} \cdot 100$$

$$\omega_{N_2} = 61,459 \%$$

Hmotnosť spalín:

$$M_{sp} = 1 - \frac{A^r}{100} + 1,306 \cdot \alpha \cdot O_{vz, min}^s [kg \cdot kg^{-1}] \quad (3.19)$$

$$M_{sp} = 1 - \frac{1,05}{100} + 1,306 \cdot 1,3 \cdot 2,656$$

$$M_{sp} = 5,498 kg \cdot kg^{-1}$$

Koncentrácia popolčeka v spalínach:

Podľa [3] volím pomerné zachytenie trosky $a_z = 0,8$, pomerný úlet popolčeka $a_u = 1 - a_z$ teda $a_u = 0,2$.

$$\mu_{pk} = \frac{A^r \cdot a_u}{100 \cdot M_{sp}} [kg \cdot kg^{-1}] \quad (3.20)$$

$$\mu_{pk} = \frac{1,05 \cdot 0,2}{100 \cdot 5,498}$$

$$\mu_{pk} = 0,0003819 kg \cdot kg^{-1}$$

3.4 Entalpia vzduchu a spalín

Entalpia teoreticky potrebného množstva vzduchu:

na 1 kg paliva pri normálnych podmienkach pre teplotu vzduchu $t_{vz} = 20^\circ C$.

$$I_{V min}^t = O_{vz, min}^s \cdot c_{vz} \cdot t_{vz} [kJ \cdot kg^{-1}] \quad (3.21)$$

Entalpia teoreticky vzniknutého množstva spalín:

$$I_{S min}^t = O_{CO_2} \cdot i_{CO_2}^t + O_{SO_2} \cdot i_{SO_2}^t + O_{N_2} \cdot i_{N_2}^t + O_{Ar} \cdot i_{Ar}^t + O_{H_2O, min}^{sp} \cdot i_{H_2O}^t + a_u \cdot A^r \cdot i_{pop}^t [kJ \cdot kg^{-1}] \quad (3.22)$$

Entalpia vzniknutých spalín s prebytkom vzduchu α :

$$I_S^{t, \alpha} = I_{S min}^t + (\alpha - 1) \cdot I_{V min}^t [kJ \cdot kg^{-1}] \quad (3.23)$$

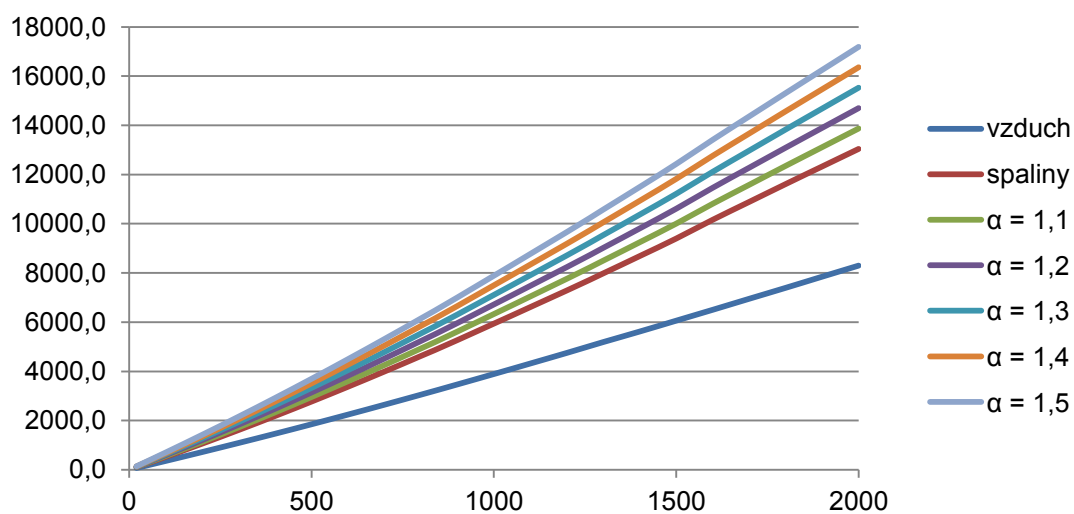
Tab. 3.1 Merná entalpia zložiek spalín

t	O ₂	CO ₂	N ₂	H ₂ O	SO ₂	Ar	popol	S. Vzduch
20	26,4	34	25,9	30,1	37,8	18,6	16,6	26,4
100	132	170	129,5	150,6	191,2	93,07	80,4	132,3
200	267	357,5	259,9	304,5	394,1	186	170	266,2
300	407	558,8	392,1	462,8	610,4	278,8	264,6	402,5
400	551	771,9	526,7	625,9	836,5	371,7	361,6	541,7
500	699	994,4	664	794,5	1070	464,7	459,5	684,1
600	850	1225	804,3	968,8	1310	557,3	558	829,6
700	1004	1462	947,3	1149	1554	650,2	658,3	978,1
800	1160	1705	1093	1335	1801	743,2	760,8	1129
900	1318	1952	1241	1526	2052	835,7	868,4	1283
1000	1477	2203	1392	1723	2304	928,2	982,8	1439
1100	1641	1458	1544	1925	2540	1020	1106	1597
1200	1804	2716	1698	2132	2803	1114	1240	1756
1300	1968	2976	1853	2344	3063	1207	1386	1919
1400	2131	3239	2009	2559	3323	1300	1543	2077
1500	2294	3503	2166	2779	3587	1393	1710	2240
1600	2463	3769	2325	3002	3838	1577	2061	2403
1700	2632	4037	2484	3230	4100	1660	2221	2568
1800	2801	4305	2643	3458	4363	1742	2381	2732
1900	2970	4575	2804	3692	4627	1800	2441	2899
2000	3138	4844	2965	3925	4890	1857	2500	3065

Tab. 3.2 Hodnoty $I - t$ diagramu

t	$I_{S \min}^t$	$I_{V \min}^t$	$I_S^{\alpha} = I_{S \min}^t + (\alpha - 1) \cdot I_{V \min}^t$						
[°C]	[kJ · kg ⁻¹]	[kJ · kg ⁻¹]	[kJ · kg ⁻¹]						
			$\alpha = 1,1$	$\alpha = 1,2$	$\alpha = 1,3$	$\alpha = 1,4$	$\alpha = 1,5$	$\alpha = 1,6$	$\alpha = 1,7$
20	104,5	71,3	111,6	118,7	125,9	133,0	140,1	147,3	154,4
100	521,8	357,4	557,6	593,3	629,1	664,8	700,6	736,3	772,0
200	1060	719	1132	1204	1276	1348	1420	1491	1563
300	1614	1088	1723	1832	1941	2049	2158	2267	2376
400	2185	1464	2332	2478	2624	2771	2917	3063	3210
500	2772	1849	2957	3142	3327	3511	3696	3881	4066
600	3375	2242	3599	3823	4047	4272	4496	4720	4944
700	3993	2644	4257	4521	4786	5050	5315	5579	5843
800	4625	3052	4931	5236	5541	5846	6151	6457	6762
900	5271	3469	5618	5965	6311	6658	7005	7352	7699
1000	5932	3891	6321	6710	7099	7488	7877	8266	8655
1100	6071	4319	6503	6935	7367	7799	8231	8663	9094
1200	7288	4749	7763	8238	8713	9188	9663	10137	10612
1300	7983	5191	8502	9021	9540	10059	10578	11097	11616
1400	8687	5619	9249	9810	10372	10934	11496	12058	12620
1500	9400	6061	10006	10612	11218	11824	12430	13036	13642
1600	10162	6502	10812	11463	12113	12763	13413	14064	14714
1700	10888	6950	11583	12278	12972	13667	14362	15057	15752
1800	11613	7395	12352	13092	13831	14571	15310	16050	16789
1900	12328	7847	13112	13897	14682	15467	16251	17036	17821
2000	13041	8298	13871	14700	15530	16360	17190	18019	18849

Obr. 3.1 $I - t$ diagram



4 Tepelná bilancia kotla

Fyzické teplo 1 kg paliva:

ak platí:

$$w^r \geq \frac{Q_i^r}{4,19} \cdot \frac{1}{150} \quad (4.1)$$

$$45 \geq \frac{9000}{4,19} \cdot \frac{1}{150}$$

$$45 \geq 14,31$$

tak:

$$Q_{pv} = c_{pv} \cdot t_{pv} \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (4.2)$$

$$Q_{pv} = 2,53 \cdot 25$$

$$Q_{pv} = 63,45 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

kde:

$$c_{pv} = c_w \cdot \frac{w^r}{100} + c_{su} \cdot \frac{100 - w^r}{100} \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (4.3)$$

$$c_{pv} = 4,19 \cdot \frac{45}{100} + 1,45 \cdot \frac{100 - 45}{100}$$

$$c_{pv} = 2,53 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Teplo privedené do praného kotla:

$$Q_{pri} = Q_i^r + Q_{pv} \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (4.4)$$

$$Q_{pri} = 9000 + 63,45$$

$$Q_{pri} = 9063,45 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

4.1 Tepelné straty parného kotla

Strata horľavinou v tuhých zvyškoch:

$$\zeta_c = \frac{Q_c}{Q_{pri}} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (4.5)$$

$$\zeta_c = \frac{\left[(1 - \eta_{dr}) \cdot a_z \cdot \frac{daf_{tr}}{100 - daf_{tr}} + a_u \cdot \frac{daf_u}{100 - daf_u} \right] \cdot 32700 \cdot A^r}{Q_{pri}} \cdot 100$$

$$\zeta_c = \frac{\left[(1 - 0,7) \cdot 0,8 \cdot \frac{10}{100 - 10} + 0,2 \cdot \frac{11}{100 - 11} \right] \cdot 32700 \cdot 1,05}{9063,45} \cdot 100$$

$$\zeta_c = 0,249 \text{ %}$$

Strata horľavinou v spalínách:

$$\zeta_{\text{CO}} = \frac{Q_{\text{CO}}}{Q_{\text{pri}}} \cdot 100 [\%] \quad (4.6)$$

$$\zeta_{\text{CO}} = \frac{0,2116 \cdot \text{mgCO} \cdot O_{\text{sp, min}}^{\text{s}}}{(21 - O_{2\text{ref}}) Q_{\text{pri}}}$$

$$\zeta_{\text{CO}} = \frac{0,2116 \cdot 250 \cdot 2,631}{(21 - 11) 9063,45}$$

$$\zeta_{\text{CO}} = 0,00153 \%$$

Strata výmenou tepla do okolia:

Podľa [3] volím

$$\zeta_{\text{SV}} = 0,87 \%$$

Strata fyzickým teplom tuhých zvyškov:

$$\zeta_{\text{fi}} = \frac{Q_{\text{fi}}}{Q_{\text{pri}}} \cdot 100 [\%] \quad (4.7)$$

$$\zeta_{\text{fi}} = \frac{a_z \cdot i_{\text{tr}} \cdot A^{\text{r}}}{Q_{\text{pri}}}$$

$$\zeta_{\text{fi}} = \frac{0,8 \cdot 558 \cdot 1,05}{9063,45}$$

$$\zeta_{\text{fi}} = 0,00517 \%$$

Strata citelným teplom spalín (komínová strata):

$$\zeta_{\text{k}} = \frac{Q_{\text{k}}}{Q_{\text{pri}}} \cdot 100 [\%] \quad (4.8)$$

$$\zeta_{\text{k}} = (100 - \zeta_{\text{c}}) \cdot \frac{(I_{\text{S}}^{\text{tk}, \alpha} - I_{\text{S}}^{\text{tvz}, \alpha})}{Q_{\text{pri}}}$$

$$\zeta_{\text{k}} = (100 - 0,249) \cdot \frac{(887,8 - 116,2)}{9063,45}$$

$$\zeta_{\text{k}} = 8,492 \%$$

Súčet tepelných strát parného kotla:

$$\sum \zeta = \zeta_{\text{c}} + \zeta_{\text{CO}} + \zeta_{\text{SV}} + \zeta_{\text{fi}} + \zeta_{\text{k}} [\%] \quad (4.9)$$

$$\sum \zeta = 0,249 + 0,00153 + 0,87 + 0,00517 + 8,492$$

$$\sum \zeta = 9,6177 \%$$

Vypočítaná účinnosť parného kotla (nepriama metóda):

$$\eta_{\text{k}} = 100 - \sum \zeta [\%] \quad (4.10)$$

$$\eta_{\text{k}} = 100 - 9,6177$$

$$\eta_{\text{k}} = 90,38 \%$$

4.2 Výrobné teplo pary a množstvo paliva

Parný výkon kotla	$M_{pp} = 6,11 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$
Entalpia prehriatej pary	$i_{pp} = 3194 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Teplota napájacej vody	$t_{nv} = 160 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Entalpia napájacej vody	$i_{nv} = 670 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Entalpia vody v bubne	$i_b = 1340 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Predpokladané množstvo odluhu	$M_o = 0,04 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

Výrobné teplo pary:

$$Q_{vyr} = M_{pp} \cdot (i_{pp} - i_{nv}) + M_o \cdot (i_b - i_{nv}) \text{ [kW]} \quad (4.11)$$

$$Q_{vyr} = 6,11 \cdot (3194 - 670) + 0,04 \cdot (1340 - 670)$$

$$Q_{vyr} = 15448,44 \text{ kW}$$

Množstvo paliva privedeného do kotla:

$$M_{pal} = \frac{Q_{vyr}}{Q_{pri} \cdot \eta_k} \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4.12)$$

$$M_{pal} = \frac{15448,44}{9063,45 \cdot 0,9038}$$

$$M_{pal} = 1,88 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Množstvo skutočne spáleného paliva

$$M_{pv} = M_{pal} \cdot \left(1 - \frac{\zeta_c}{100}\right) \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4.13)$$

$$M_{pv} = 1,88 \cdot \left(1 - \frac{0,249}{100}\right)$$

$$M_{pv} = 1,876 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

5 Rozdelenie tepelného výkonu kotla

Tlakové straty:

- EKO	$\Delta p_{\text{EKO}} =$	0,2	MPa
- Výparník	$\Delta p_{\text{výp}} =$	0	MPa
- Závesné rúry	$\Delta p_{\text{zr}} =$	0,05	MPa
- Prehrievač pary 1	$\Delta p_{\text{PP1}} =$	0,2	MPa
- Prehrievač pary 2	$\Delta p_{\text{PP2}} =$	0,2	MPa
- Prehrievač pary 3	$\Delta p_{\text{PP3}} =$	0,1	MPa

Tlak napájacej vody:

$$p_{\text{nv}} = p_{\text{pp}} + \Delta p_{\text{PP3}} + \Delta p_{\text{PP2}} + \Delta p_{\text{PP1}} + \Delta p_{\text{zr}} + \Delta p_{\text{výp}} + \Delta p_{\text{EKO}} \text{ [MPa]} \quad (5.1)$$

$$p_{\text{nv}} = 8,0 + 0,1 + 0,2 + 0,2 + 0,05 + 0 + 0,2$$

$$p_{\text{nv}} = 8,75 \text{ MPa}$$

5.1 Výkon ohrievača vody (EKA)

Teplota vody na výstupe z EKA $t_{\text{vEKO}} = 220 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Entalpia vody na výstupe z EKA $i_{\text{vEKO}} = 944 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

Návrh množstva vstreku:

$$M_v = 0,05 \cdot M_{\text{pp}} \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5.2)$$

$$M_v = 0,05 \cdot 6,11$$

$$M_v = 0,3 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Tepelný výkon ohrievača vody:

$$Q_{\text{EKO}} = (M_{\text{pp}} + M_o + M_v) \cdot (i_{\text{vEKO}} - i_{\text{nv}}) \text{ [kW]} \quad (5.3)$$

$$Q_{\text{EKO}} = (6,11 + 0,04 + 0,3) \cdot (944 - 670)$$

$$Q_{\text{EKO}} = 1602,9 \text{ kW}$$

5.2 Výkon výparníka

Do výparníka vstupuje voda z ekonomizéra a vystupuje sýta para a odluh.

Entalpia vody v bubune $i_b = 1340 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

Entalpia pary na výstupe z výparníka $i_p = 2750 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

Tlak v bubne:

$$p_b = p_{\text{pp}} + \Delta p_{\text{PP3}} + \Delta p_{\text{PP2}} + \Delta p_{\text{PP1}} + \Delta p_{\text{zr}} \text{ [MPa]} \quad (5.4)$$

$$p_b = 8,0 + 0,1 + 0,2 + 0,2 + 0,05$$

$$p_b = 8,55 \text{ MPa}$$

Tepelný výkon výparníka:

$$Q_{\text{výp}} = (M_{\text{pp}} - M_{\text{v}}) \cdot (i_{\text{p}} - i_{\text{vEKO}}) + M_{\text{o}} \cdot (i_{\text{b}} - i_{\text{vEKO}}) \text{ [kW]} \quad (5.5)$$

$$Q_{\text{výp}} = (6,11 - 0,3) \cdot (2750 - 944) + 0,04 \cdot (1340 - 944)$$

$$Q_{\text{výp}} = 10508,52 \text{ kW}$$

5.3 Výkon závesných rúr

Závesné rúry slúžia ako chladené závesné zariadenie pre prehrievače pary, zároveň privádzajú paru z bubna do prehrievača pary 1. Sú zapojené ako súprúd.

$$\text{Teplota pary na výstupe z výparníka} \quad t_{\text{p}} = 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Teplota pary na výstupe zo závesných rúr} \quad t_{\text{zr}} = 306 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Entalpia pary na vstupe} \quad i_{\text{p}} = 2750 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$\text{Entalpia pary na výstupe} \quad i_{\text{zr}} = 2787 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$Q_{\text{zr}} = (M_{\text{pp}} - M_{\text{v}}) \cdot (i_{\text{zr}} - i_{\text{p}}) \text{ [kW]} \quad (5.6)$$

$$Q_{\text{zr}} = (6,11 - 0,3) \cdot (2787 - 2750)$$

$$Q_{\text{zr}} = 214,97 \text{ kW}$$

5.4 Výkon prehrievača pary:

Z dôvodu jednoduchšej regulácie teploty výstupnej pary ale aj možnosti údržby a prípadnej opravy bude prehrievač pary rozdelený na tri časti. Regulácia vstrekom napájacej vody bude realizovaná vstrekom za prvou a druhou časťou prehrievača pary. Umiestnenie prehrievača pary bude v treťom ťahu kotla.

$$\text{Teplota pary za prvou časťou prehrievača pary} \quad t_{\text{pp1}} = 345 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Entalpia pary za prvou časťou prehrievača pary} \quad i_{\text{pp1}} = 2961,7 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Tlak pary za prvou časťou prehrievača pary:

$$p_{\text{pp1}} = p_{\text{pp}} + \Delta p_{\text{pp3}} + \Delta p_{\text{pp2}} \text{ [MPa]} \quad (5.7)$$

$$p_{\text{pp1}} = 8,0 + 0,1 + 0,2$$

$$p_{\text{pp1}} = 8,3 \text{ MPa}$$

Tepelný výkon prvej časti prehrievača:

$$Q_{\text{pp1}} = (M_{\text{pp}} - M_{\text{v}}) \cdot (i_{\text{pp1}} - i_{\text{zr2}}) \text{ [kW]} \quad (5.8)$$

$$Q_{\text{pp1}} = (6,11 - 0,3) \cdot (2961,7 - 2787)$$

$$Q_{\text{pp1}} = 1015,007 \text{ kW}$$

Entalpia pary za vstrekom č.1:

$$i_{PP1vs} = \frac{\left(M_{pp} - \frac{M_v}{2}\right) \cdot i_{PP1} + \frac{M_v}{2} \cdot i_{nv}}{M_{pp}} \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (5.9)$$

$$i_{PP1vs} = \frac{\left(6,11 - \frac{0,3}{2}\right) \cdot 2961,7 + \frac{0,3}{2} \cdot 670}{6,11}$$

$$i_{PP1vs} = 2905,43 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Tlak pary za druhou časťou prehrievača pary:

$$p_{PP2} = p_{pp} + \Delta p_{PP3} \text{ [MPa]} \quad (5.10)$$

$$p_{PP2} = 8,0 + 0,1$$

$$p_{PP2} = 8,1 \text{ MPa}$$

Tepelný výkon druhej časti prehrievača:

Teplota pary za druhou časťou prehrievača pary

$$t_{PP2} = 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Entalpia pary za druhou časťou prehrievača pary

$$i_{PP2} = 3137,3 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$Q_{PP2} = \left(M_{pp} - \frac{M_v}{2}\right) \cdot (i_{PP2} - i_{PP1vs}) \text{ [kW]} \quad (5.11)$$

$$Q_{PP2} = (6,11 - 0,3) \cdot (3137,3 - 2905,4)$$

$$Q_{PP2} = 1382,124 \text{ kW}$$

Entalpia pary za vstrekom č.2:

$$i_{PP2vs} = \frac{\left(M_{pp} - \frac{M_v}{2}\right) \cdot i_{PP2} + \frac{M_v}{2} \cdot i_{nv}}{M_{pp}} \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (5.12)$$

$$i_{PP2vs} = \frac{\left(6,11 - \frac{0,3}{2}\right) \cdot 3137,3 + \frac{0,3}{2} \cdot 670}{6,11}$$

$$i_{PP2vs} = 3076,72 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Tepelný výkon tretej časti prehrievača pary:

$$Q_{PP3} = M_{pp} \cdot (i_{pp} - i_{PP2vs}) \text{ [kW]} \quad (5.13)$$

$$Q_{PP3} = 6,11 \cdot (3194 - 3076,72)$$

$$Q_{PP3} = 716,532 \text{ kW}$$

5.5 Tepelný výkon všetkých teplovýmenných plôch

$$\sum Q_i = Q_{EKO} + Q_{výp} + Q_{zr} + Q_{PP1} + Q_{PP2} + Q_{PP3} \text{ [kW]} \quad (5.14)$$

$$\sum Q_i = 1602,9 + 10508,82 + 214,97 + 1015,007 + 1382,124 + 716,532$$

$$\sum Q_i = 15440,353 \text{ kW}$$

5.6 Tepelné bilancie jednotlivých teplovýmenných plôch:

5.6.1 Tepelná bilancia ohrievača vzduchu

Teplota vzduchu na vstupe do ohrievača vzduchu	$t_{vzin} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Teplota vzduchu na výstupe z ohrievača vzduchu	$t_{vzout} = 240 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Teplota spalín na výstupe z kotla	$t_k = 140 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Entalpia vzduchu na vstupe do ohrievača vzduchu	$l_{vzin} = 71,3 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Entalpia vzduchu na výstupe z ohrievača vzduchu	$l_{vzout} = 866,6 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Entalpia spalín na výstupe z ohrievača vzduchu	$l_k = 837 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Tepelná strata (pomerná)	$\zeta_{OVZ} = 0,0002$
Stredný súčiniteľ prebytku vzduchu	$\beta^1_{OVZ} = \beta^2_{OVZ} = 1,3$

Tepelný výkon ohrievača vzduchu:

$$Q_{OVZ} = M_{pv} \cdot (\beta^1_{OVZ} \cdot l_{vout} - \beta^2_{OVZ} \cdot l_{vin}) \text{ [kW]} \quad (5.15)$$

$$Q_{OVZ} = 1,876 \cdot (1,3 \cdot 866,6 - 1,3 \cdot 71,3)$$

$$Q_{OVZ} = 2020,774 \text{ kW}$$

Strata ohrievača vzduchu sálaním a vedením tepla do okolia:

$$Q_{sOVZ} = \zeta_{OVZ} \cdot M_{pv} \cdot Q_{pri} \text{ [kW]} \quad (5.16)$$

$$Q_{sOVZ} = 0,0002 \cdot 1,876 \cdot 9069,45$$

$$Q_{sOVZ} = 3,402 \text{ kW}$$

Entalpia spalín na vstupe do ohrievača vzduchu:

$$l_{sOVZ} = \frac{Q_{OVZ} + Q_{sOVZ} + M_{pv} \cdot l_k}{M_{pv}} \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (5.17)$$

$$l_{sOVZ} = \frac{2020,774 + 3,402 + 1,876 \cdot 837}{1,876}$$

$$l_{sOVZ} = 1916,385 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Podľa I – t diagramu je teplota spalín pred ohrievačom vzduchu 296 °C.

5.6.2 Tepelná bilancia ohrievača vody

Tepelná strata (pomerná) $\zeta_{EKO} = 0,0003$

Strata ohrievača vody sálaním a vedením tepla do okolia:

$$Q_{sEKO} = \zeta_{EKO} \cdot M_{pv} \cdot Q_{pri} \text{ [kW]} \quad (5.18)$$

$$Q_{sEKO} = 0,0003 \cdot 1,876 \cdot 9069,45$$

$$Q_{sEKO} = 5,104 \text{ kW}$$

Entalpia spalín na vstupe do ohrievača vody:

$$I_{sEKO} = \frac{Q_{EKO} + Q_{sEKO} + M_{pv} \cdot I_{sOVZ}}{M_{pv}} \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (5.19)$$

$$I_{sEKO} = \frac{1602,9 + 5,104 + 1,876 \cdot 1916,385}{1,876}$$

$$I_{sEKO} = 2773,529 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Podľa I – t diagramu je teplota spalín pred ohrievačom vody 421 °C.

5.6.3 Tepelná bilancia prvej časti prehrievača pary

Tepelná strata (pomerná)

$$\zeta_{PP1} = 0,0002$$

Tepelný výkon paralelných výhrevných plôch

$$Q_{parPP1} = 200 \text{ kW}$$

Strata prvej časti prehrievača pary sálaním a vedením tepla do okolia:

$$Q_{sPP1} = \zeta_{PP1} \cdot M_{pv} \cdot Q_{pri} \text{ [kW]} \quad (5.20)$$

$$Q_{sPP1} = 0,0002 \cdot 1,876 \cdot 9069,45$$

$$Q_{sPP1} = 3,402 \text{ kW}$$

Entalpia spalín na vstupe do prvej časti ohrievača:

$$I_{sPP1} = \frac{Q_{PP1} + Q_{sPP1} + Q_{parPP1} + M_{pv} \cdot I_{sEKO}}{M_{pv}} \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (5.21)$$

$$I_{sPP1} = \frac{1015,007 + 3,402 + 247 + 1,876 \cdot 2773,529}{1,876}$$

$$I_{sPP1} = 3448,054 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Podľa I – t diagramu je teplota spalín pred prvou časťou prehrievača pary 517 °C.

5.6.4 Tepelná bilancia druhej časti prehrievača pary

Tepelná strata (pomerná)

$$\xi_{PP2} = 0,0002$$

Tepelný výkon paralelných výhrevných plôch

$$Q_{parPP2} = 280 \text{ kW}$$

Strata druhej časti prehrievača pary sálaním a vedením tepla do okolia:

$$Q_{sPP2} = \xi_{PP2} \cdot M_{pv} \cdot Q_{pri} \text{ [kW]} \quad (5.22)$$

$$Q_{sPP2} = 0,0002 \cdot 1,876 \cdot 9069,45$$

$$Q_{sPP2} = 3,402 \text{ kW}$$

Entalpia spalín na vstupe do druhej časti ohrievača:

$$I_{sPP2} = \frac{Q_{PP2} + Q_{sPP2} + Q_{parPP2} + M_{pv} \cdot I_{sPP1}}{M_{pv}} \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (5.23)$$

$$I_{sPP2} = \frac{1382,24 + 3,402 + 280 + 1,876 \cdot 3448,054}{1,876}$$

$$I_{sPP2} = 4335,92 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Podľa I – t diagramu je teplota spalín pred druhou časťou prehrievača pary 639 °C.

5.6.5 Tepelná bilancia tretej časti prehrievača pary

Tepelná strata (pomerná) $\xi_{PP3} = 0,0002$

Tepelný výkon paralelných výhrevných plôch $Q_{parPP2} = 400 \text{ kW}$

Strata tretej časti prehrievača pary sálaním a vedením tepla do okolia:

$$Q_{sPP3} = \xi_{PP3} \cdot M_{pv} \cdot Q_{pri} \text{ [kW]} \quad (5.24)$$

$$Q_{sPP3} = 0,0002 \cdot 1,876 \cdot 9069,45$$

$$Q_{sPP3} = 3,402 \text{ kW}$$

Entalpia spalín na vstupe do tretej časti ohrievača:

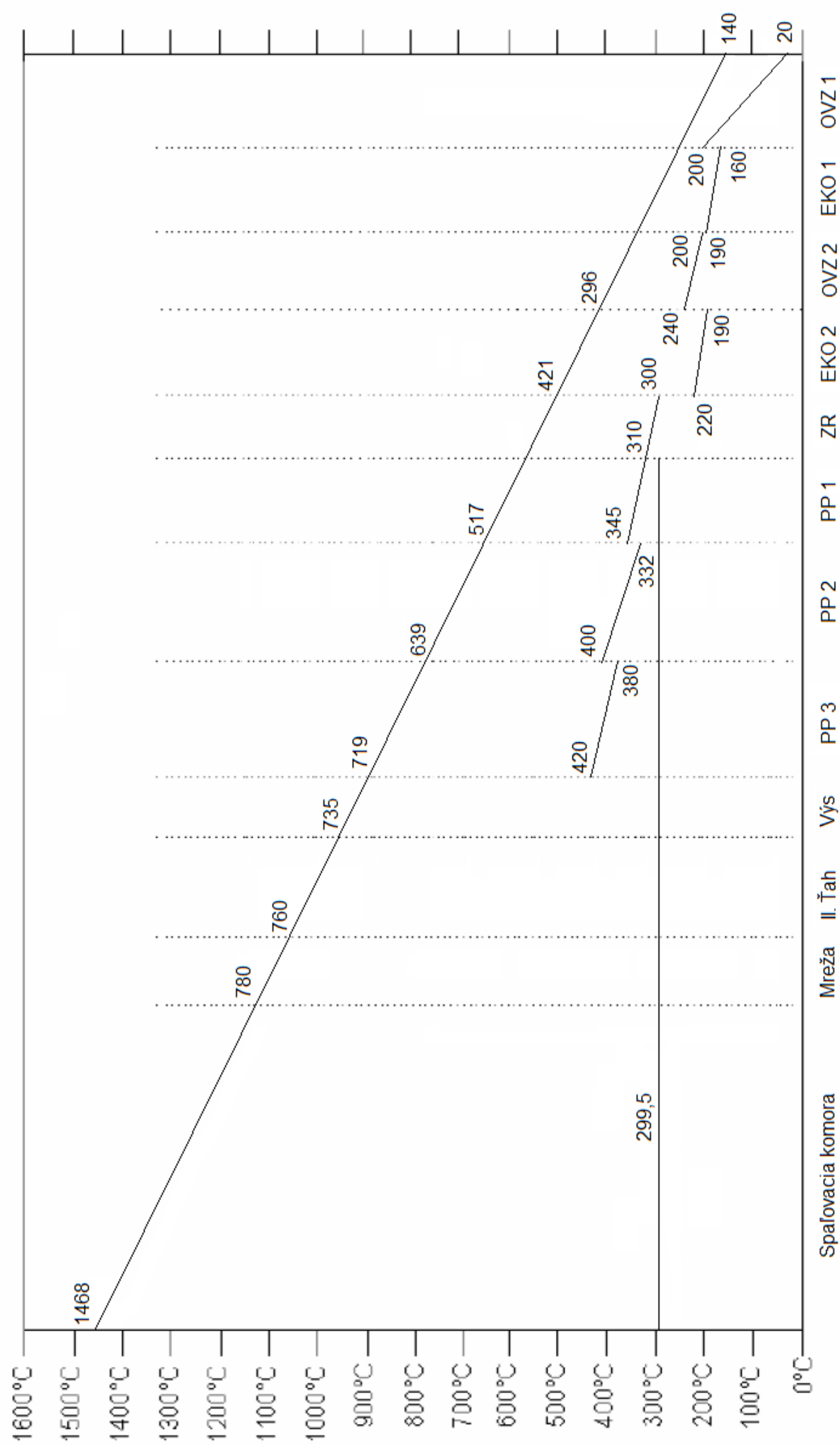
$$I_{sPP3} = \frac{Q_{PP3} + Q_{sPP3} + Q_{parPP3} + M_{pv} \cdot I_{sPP2}}{M_{pv}} \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (5.25)$$

$$I_{sPP3} = \frac{716,532 + 3,402 + 400 + 1,876 \cdot 4335,92}{1,876}$$

$$I_{sPP3} = 4932,902 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Podľa I – t diagramu je teplota spalín pred treťou časťou prehrievača pary 719 °C.

Obr. 5.1 Pílový diagram



6 Výpočet ohniska (spaľovacej komory)

Výpočtový prierez ohniska (predbežný):

Tepelné zaťaženie rošta $q_s = 2000 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$.

$$S_o = \frac{M_{\text{pal}} \cdot Q_i^r}{q_s} [\text{m}^2] \quad (6.1)$$

$$S_o = \frac{1,88 \cdot 9000}{2000}$$

$$S_o = 8,46 \text{ m}^2$$

Výpočtový objem ohniska (predbežný):

Objemové zaťaženie spaľovacej komory $q_v = 180 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-3}$.

$$V_o = \frac{M_{\text{pal}} \cdot Q_i^r}{q_v} [\text{m}^3] \quad (6.2)$$

$$V_o = \frac{1,88 \cdot 9000}{180}$$

$$V_o = 94 \text{ m}^3$$

Výpočtová výška ohniska (predbežná):

$$h = \frac{V_o}{S_o} [\text{m}] \quad (6.3)$$

$$h = \frac{94}{8,46}$$

$$h = 11,1 \text{ m} \Rightarrow \text{volím } 9,0 \text{ m}$$

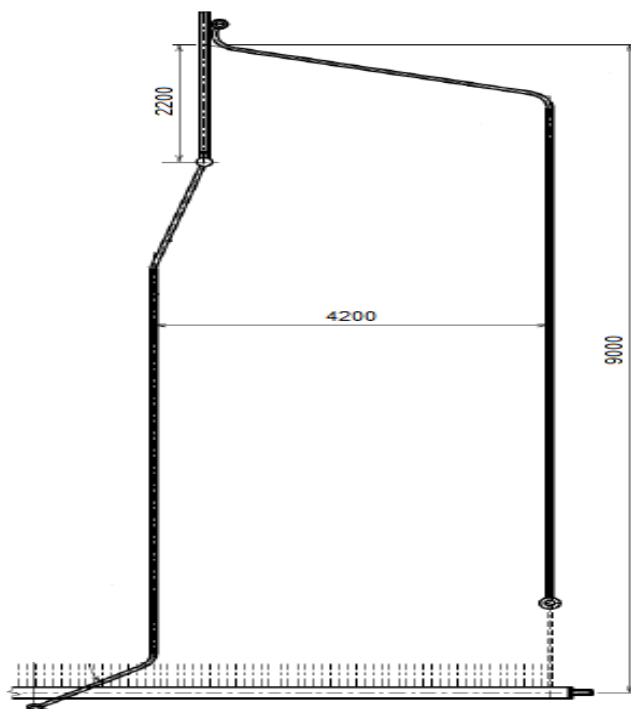
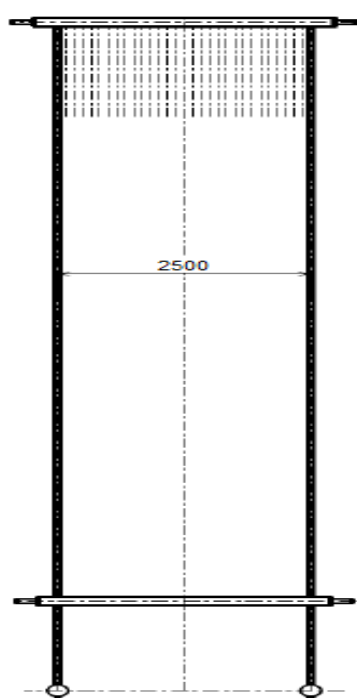
Z prierezu ohniska som určil rozmery stien ohniska:

predná stena $a = 2,5 \text{ m}$

bočná stena $b = 4,2 \text{ m}$

výška mreže $c = 2,2 \text{ m}$

Obr. 6.1 Rozmery spaľovacej komory



Projekčná plocha stien ohniska:

$$S_{\text{proj}} = \sum_i b_i \cdot l_i \text{ [m}^2\text{]} \quad (6.4)$$

$$S_{\text{proj}} = 2 \cdot (a \cdot b + a \cdot h + b \cdot h)$$

$$S_{\text{proj}} = 2 \cdot (2,5 \cdot 4,2 + 2,5 \cdot 9 + 4,2 \cdot 9)$$

$$S_{\text{proj}} = 141,6 \text{ m}^2$$

Objem ohniska (skutočný):

$$V_o = a \cdot b \cdot h \text{ [m}^3\text{]} \quad (6.5)$$

$$V_o = 2,5 \cdot 4,2 \cdot 9$$

$$V_o = 94,5 \text{ m}^3$$

Účinná sálavá výhrevná plocha:

Uhlový súčiniteľ osálenia plochy volím $\varphi_{os} = 0,95$.

$$S_{us} = (S_{\text{proj}} - a \cdot c - a \cdot b) \cdot \varphi_{os} \text{ [m}^2\text{]} \quad (6.6)$$

$$S_{us} = (141,6 - 2,5 \cdot 2,2 - 2,5 \cdot 4,2) \cdot 0,95$$

$$S_{us} = 119,32 \text{ m}^2$$

Efektívna sálavá hrúbka:

$$s = 3,6 \frac{V_o}{S_{\text{proj}}} \text{ [m]} \quad (6.7)$$

$$s = 3,6 \frac{94,5}{141,6}$$

$$s = 2,402 \text{ m}$$

Teploto privedené zo vzduchu:

Teplota vzduchu privádzaného do kotla je 240 °C teda entalpia je $l_v^{tovz} = 800 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

$$Q_v = \alpha \cdot l_v^{tovz} [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.8)$$

$$Q_v = 1,3 \cdot 800$$

$$Q_v = 1040 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Teploto uvoľnené v ohnisku:

$$Q_u = Q_{pri} \cdot (1 - \zeta_{CO} - \zeta_c - \zeta_{fi}) + Q_v [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.9)$$

$$Q_u = 9063,45 \cdot (1 - 0,00249 - 0,0000153 - 0,0000517) + 1040$$

$$Q_u = 10080,274 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Z I – t diagramu bola určená teplota nechladeného plameňa $t_{np} = 1468 \text{ °C}$.

Súčiniteľ oslabenia sálania popolčekomými časticami:

Teplotu spalín na výstupe z ohniska predbežne volím $t_{ok} = 780 \text{ °C}$ a stredný priemer častíc popolčeka volím $d_{pk} = 20 \text{ μm}$.

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_{ok} + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}} [\text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}] \quad (6.10)$$

$$k_p = \frac{5,7 \cdot 10^4}{\sqrt[3]{(780 + 273,15)^2 \cdot 20^2}}$$

$$k_p = 74,735 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Celkový pomerný objem vodných pár a trojatómových plynov v spaliniách:

$$\omega_c = \omega_{H_2O} + \omega_{CO_2} + \omega_{SO_2} [\%] \quad (6.11)$$

$$\omega_c = 21,983 + 12,115 + 0,00621$$

$$\omega_c = 34,1 \%$$

Súčet parciálnych tlakov trojatómových plynov a vodných pár:

Celkový tlak v ohnisku volím $p = 0,1 \text{ MPa}$.

$$p_c = \omega_c \cdot p [\text{MPa}] \quad (6.12)$$

$$p_c = 0,341 \cdot 0,1$$

$$p_c = 0,0341 \text{ MPa}$$

Súčiniteľ oslabenia sálania trojatómovými plynmi a vodnými parami:

$$k_s \cdot \omega_c = \left(\frac{2,49 + 5,11 \cdot \omega_{H_2O}}{\sqrt{p_c \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_{ok} + 273,15}{1000} \right) \cdot \omega_c [\text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}] \quad (6.13)$$

$$k_s = \left(\frac{2,49 + 5,11 \cdot 0,219}{\sqrt{0,0341 \cdot 2,4}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{780 + 273,15}{1000} \right)$$

$$k_s = 7,077 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Optická hustota plameňa:

$$k \cdot p \cdot s = (k_s \cdot \omega_c + k_p \cdot \mu_{pk}) \cdot p \cdot s \quad (6.14)$$

$$k \cdot p \cdot s = (7,077 \cdot 0,341 + 74,735 \cdot 0,0003819) \cdot 0,1 \cdot 2,4$$

$$k \cdot p \cdot s = 0,586$$

Efektívny stupeň čiernosti plameňa:

$$a_{pl} = 1 - e^{-kps} \quad (6.15)$$

$$a_{pl} = 1 - e^{-0,586}$$

$$a_{pl} = 0,443$$

Súčiniteľ tepelnej efektívnosti stien ohniska:

Súčiniteľ zanesenia stien ohniska volím $\xi_o = 0,6$.

$$\psi = \varphi_{os} \cdot \xi_o \quad (6.16)$$

$$\psi = 0,95 \cdot 0,6$$

$$\psi = 0,57$$

Stupeň čiernosti plameňa:

$$a_o = \frac{a_{pl} + (1 - a_{pl}) \cdot \frac{S_{rt}}{S_{proj}}}{1 - (1 - a_{pl}) \cdot (1 - \psi) \cdot \left(1 - \frac{S_{rt}}{S_{proj}}\right)} \quad (6.17)$$

$$a_o = \frac{0,443 + (1 - 0,443) \cdot \frac{10,5}{142}}{1 - (1 - 0,443) \cdot (1 - 0,57) \cdot \left(1 - \frac{10,5}{142}\right)}$$

$$a_o = 0,616$$

Súčiniteľ zachovania tepla:

$$\varphi = 1 - \frac{\zeta_{SV}}{\eta_k - \zeta_{SV}} \quad (6.18)$$

$$\varphi = 1 - \frac{0,87}{90,38 - 0,87}$$

$$\varphi = 0,99$$

Stredná špecifická tepelná kapacita spalín z 1 kg paliva:

$$\overline{c_B} = \frac{Q_u - I_{ok}}{t_{np} - t_{ok}} \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (6.19)$$

$$\overline{c_B} = \frac{10080 - 5390}{1468 - 780}$$

$$\overline{c_B} = 6,816 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Boltzmanovo kritérium:

Súčiniteľ sálania absolútneho čierneho telesa $\sigma_{ač} = 5,67 \cdot 10^{-11}$.

$$B_O = \frac{\varphi \cdot M_{pv} \cdot \overline{c_B}}{\sigma_{ač} \cdot \psi \cdot S_{proj} \cdot (t_{np} + 273,15)^3} \quad (6.20)$$

$$B_O = \frac{0,99 \cdot 1,876 \cdot 6,816}{5,76 \cdot 10^{-11} \cdot 0,57 \cdot 142 \cdot (1468 + 273,15)^3}$$

$$B_O = 0,514$$

Parameter M:

Poloha maximálnej teploty plameňa pre roštové ohniská $x_{pl} = 0$.

$$M = 0,59 - 0,5 \cdot x_{pl} \quad (6.21)$$

$$M = 0,59$$

Teplota spalín na výstupe z ohniska:

$$t_{ok} = \frac{t_{np} + 273,15}{1 + M \cdot \left(\frac{a_o}{B_O}\right)^{0,6}} - 273,15 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (6.22)$$

$$t_{ok} = \frac{1468 + 273,15}{1 + 0,59 \cdot \left(\frac{0,616}{0,514}\right)^{0,6}} - 273,15$$

$$t_{ok} = 777,195 \text{ }^\circ\text{C}$$

Teplota spalín na výstupe z ohniska $t_{ok} = 777 \text{ }^\circ\text{C}$ je od zvolenej o $3 \text{ }^\circ\text{C}$ menšia čo je v platnom rozsahu $\pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$, zároveň je dostatočne nižšia od teploty mäknutia popola $t_a = 1100 \text{ }^\circ\text{C}$.

Teplo prebrané v ohnisku:

$$Q_{os} = \varphi \cdot (Q_u - I_{ok}) \cdot M_{pv} \text{ [kW]} \quad (6.23)$$

$$Q_{os} = 0,99 \cdot (10080 - 5367) \cdot 1,876$$

$$Q_{os} = 8753,172 \text{ kW}$$

Stredné tepelné zaťaženie účinnej sálavej plochy:

$$\overline{q_{us}} = \frac{Q_{os}}{S_{us}} \text{ [kW} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (6.24)$$

$$\overline{q_{us}} = \frac{8753,172}{119,32}$$

$$\overline{q_{us}} = 73,358 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$$

Objemový prietok spalín:

$$V_s = M_{pv} \cdot [O_{sp, min}^v + (\alpha - 1) \cdot O_{vz, min}^v] \text{ [Nm}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (6.25)$$

$$V_s = 1,876 \cdot [3,584 + (1,3 - 1) \cdot 2,699]$$

$$V_s = 8,242 \text{ Nm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Stredná teplota spalín:

$$\bar{t}_s = \frac{t_{np} + t_{ok}}{2} [^{\circ}\text{C}] \quad (6.26)$$

$$\bar{t}_s = \frac{1468 + 777}{2}$$

$$\bar{t}_s = 1122,5 ^{\circ}\text{C}$$

Prierez spaľovacej komory:

$$F_s = a \cdot b [\text{m}^2] \quad (6.27)$$

$$F_s = 2,5 \cdot 4,2$$

$$F_s = 10,5 \text{ m}^2$$

Rýchlosť spalín na výstupe zo spaľovacej komory:

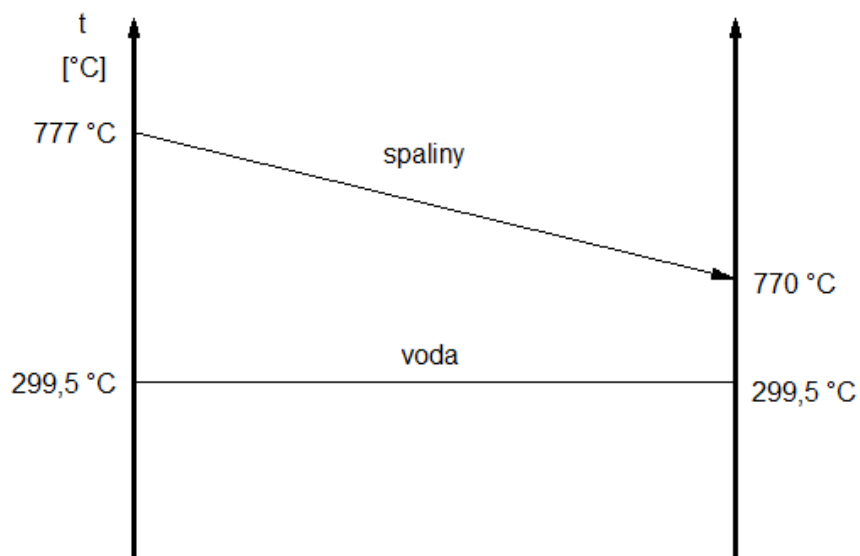
$$w_s = \frac{V_s}{F_s} \cdot \frac{273,15 + \bar{t}_s}{273,15} [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (6.28)$$

$$w_s = \frac{8,242}{10,5} \cdot \frac{273,15 + 1122,5}{273,15}$$

$$w_s = 4,010 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

7 Výpočet mreže medzi I. a II. ťahom

Obr. 7.1 Diagram teplôt mreže medzi I. a II. ťahom



Počet rúr v rade

$$z_1 = 1$$

Počet radov rúr

$$z_2 = 4$$

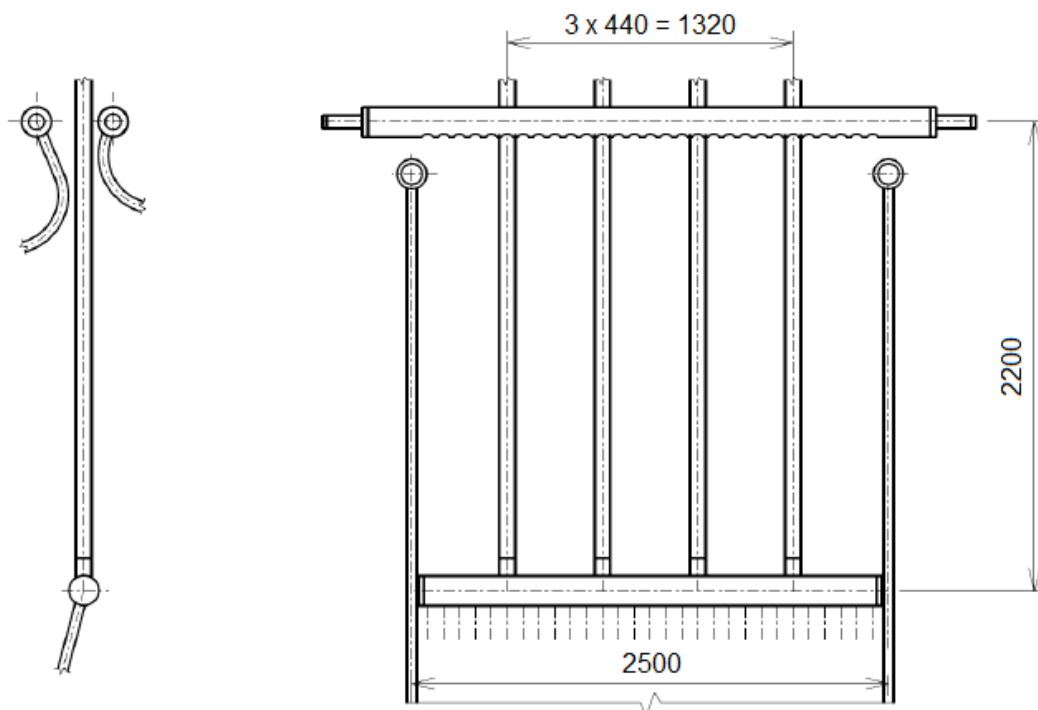
Priečný rozstup rúr

$$s_1 = 0,44 \text{ m}$$

Priemer rúr

$$D = 0,1143 \text{ m}$$

Obr. 7.2 Rozmery mreže medzi I. a II. ťahom



Stredná teplota spalín mreže:

$$t_{str} = \frac{t_{ok} + t_{mr}}{2} [^{\circ}\text{C}] \quad (7.1)$$

$$t_{str} = \frac{777 + 770}{2}$$

$$t_{str} = 773,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Skutočná rýchlosť spalín:

$$w_s = \frac{V_s}{c \cdot (a - z_2 \cdot D)} \cdot \frac{273,15 + t_{str}}{273,15} [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (7.2)$$

$$w_s = \frac{8,242}{2,2 \cdot (2,5 - 4 \cdot 0,1143)} \cdot \frac{273,15 + 773,5}{273,15}$$

$$w_s = 7,027 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Korekcia na počet rúr v rade $z_1 < 10$:

$$C_z = 0,91 + 0,0125 \cdot (z_1 - 2) \quad (7.3)$$

$$C_z = 0,91 + 0,0125 \cdot (1 - 2)$$

$$C_z = 0,897$$

Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou:

Hodnoty pre strednú teplotu 773,5 °C:

Súčiniteľ tepelnej vodivosti spalín

$$\lambda_s = 8,88 \cdot 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Kinematická viskozita

$$\nu_s = 125,89 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Prandtlovo číslo

$$\text{Pr} = 0,6$$

Nakoľko je konštrukčné prevedenie mreže iba z jedného priečneho radu rúr je korekcia na geometrickú konfiguráciu $C_s = 1$.

$$\alpha_k = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left(\frac{w_s \cdot D}{\nu_s} \right)^{0,65} \cdot \text{Pr}^{0,33} [\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (7.4)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 0,897 \cdot 1 \cdot \frac{0,088}{0,1143} \cdot \left(\frac{7,027 \cdot 0,1143}{125,89 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,65} \cdot 0,6^{0,33}$$

$$\alpha_k = 34,688 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Teplota zaneseného povrchu rúr:

$$t_{za} = t_{sy} + \Delta t [^{\circ}\text{C}] \quad (7.5)$$

$$t_{za} = 299,5 + 80$$

$$t_{za} = 379,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Súčiniteľ oslabenia sáľania popolčkovými časticami:

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_{ok} + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}} \text{ [m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}] \quad (7.6)$$

$$k_p = \frac{5,7 \cdot 10^4}{\sqrt[3]{(773,5 + 273,15)^2 \cdot 20^2}}$$

$$k_p = 75,044 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Efektívna hrúbka sáľavej vrstvy:

$$s = 0,9 \cdot D \text{ [m]} \quad (7.7)$$

$$s = 0,9 \cdot 0,1143$$

$$s = 0,102 \text{ m}$$

Súčiniteľ oslabenia sáľania trojatómovými plynmi a vodnými parami:

$$k_s \cdot \omega_c = \left(\frac{2,49 + 5,11 \cdot \omega_{H_2O}}{\sqrt{p_c \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_{str} + 273,15}{1000} \right) \cdot \omega_c \text{ [m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}] \quad (7.8)$$

$$k_s = \left(\frac{2,49 + 5,11 \cdot 0,219}{\sqrt{0,0341 \cdot 0,102}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{773,5 + 273,15}{1000} \right)$$

$$k_s = 36,871 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Optická hustota spalín:

$$k \cdot p \cdot s = (k_s \cdot \omega_c + k_p \cdot \mu_{pk}) \cdot p \cdot s \quad (7.9)$$

$$k \cdot p \cdot s = (36,871 \cdot 0,341 + 75,044 \cdot 0,0003819) \cdot 0,1 \cdot 0,102$$

$$k \cdot p \cdot s = 0,128$$

Efektívny stupeň čiernosti plameňa:

$$a_{sn} = 1 - e^{-kps} \quad (7.10)$$

$$a_{sn} = 1 - e^{-0,128}$$

$$a_{sn} = 0,120$$

Súčiniteľ prestupu tepla sáľaním:

Stupeň čiernosti zanesených stien sáľavých plôch volím $a_{za} = 0,8$.

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{za} + 1}{2} \cdot a_{sn} \cdot (t_{str} + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{t_{za} + 273,15}{t_{str} + 273,15} \right)^4}{1 - \frac{t_{za} + 273,15}{t_{str} + 273,15}} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (7.11)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,120 \cdot (773,5 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{379,5 + 273,15}{773,5 + 273,15} \right)^4}{1 - \frac{379,5 + 273,15}{773,5 + 273,15}}$$

$$\alpha_{sal} = 15,915 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Celkový súčiniteľ prestupu tepla:

Súčiniteľ omývania volím $\omega = 1$.

$$\alpha_s = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_{sal}) [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (7.12)$$

$$\alpha_s = 1 \cdot (34,688 + 15,915)$$

$$\alpha_s = 50,603 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$$

Súčiniteľ prestupu tepla:

Súčiniteľ zanesenia volím $\varepsilon = 0,0057 m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$.

$$k = \frac{\alpha_s}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_s} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (7.13)$$

$$k = \frac{50,603}{1 + 0,0057 \cdot 50,603}$$

$$k = 39,274 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

Teplovýmenná plocha mreže:

$$S = \pi \cdot D \cdot c \cdot z_1 \cdot z_2 [m^2] \quad (7.14)$$

$$S = \pi \cdot 0,1143 \cdot 2,2 \cdot 1 \cdot 4$$

$$S = 3,15 m^2$$

Logaritmický rozdiel teplôt:

$$\Delta t_1 = t_s^{in} - t_{syt} [^{\circ}C] \quad (7.15)$$

$$\Delta t_1 = 777 - 299,5$$

$$\Delta t_1 = 477,5 ^{\circ}C$$

$$\Delta t_2 = t_s^{out} - t_{syt} [^{\circ}C] \quad (7.16)$$

$$\Delta t_2 = 770 - 299,5$$

$$\Delta t_2 = 470,5 ^{\circ}C$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} [^{\circ}C] \quad (7.17)$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{477,5 - 470,5}{\ln \frac{477,5}{470,5}}$$

$$\Delta t_{ln} = 473,991 ^{\circ}C$$

Teplo odobrané mrežou spalínám:

$$Q_{mre} = k \cdot S \cdot \Delta t_{ln} \cdot 10^{-3} [kW] \quad (7.18)$$

$$Q_{mre} = 39,274 \cdot 3,15 \cdot 473,991 \cdot 10^{-3}$$

$$Q_{mre} = 58,638 kW$$

Teplo spalín na vstupe:

$$Q_{in} = I_{ok} \cdot M_{pv} [kW] \quad (7.19)$$

$$Q_{in} = 5367 \cdot 1,876$$

$$Q_{in} = 10\,068,492 kW$$

Teplo spalín na výstupe:

$$Q_{\text{out}} = Q_{\text{in}} - Q_{\text{mre}} \text{ [kW]} \quad (7.20)$$

$$Q_{\text{out}} = 10\,068,492 - 58,638$$

$$Q_{\text{out}} = 10\,009,854 \text{ kW}$$

Entalpia spalín za mrežou:

$$I_{\text{mre}}^s = \frac{Q_{\text{out}}}{M_{\text{pv}}} \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (7.21)$$

$$I_{\text{mre}}^s = \frac{10\,009,854}{1,876}$$

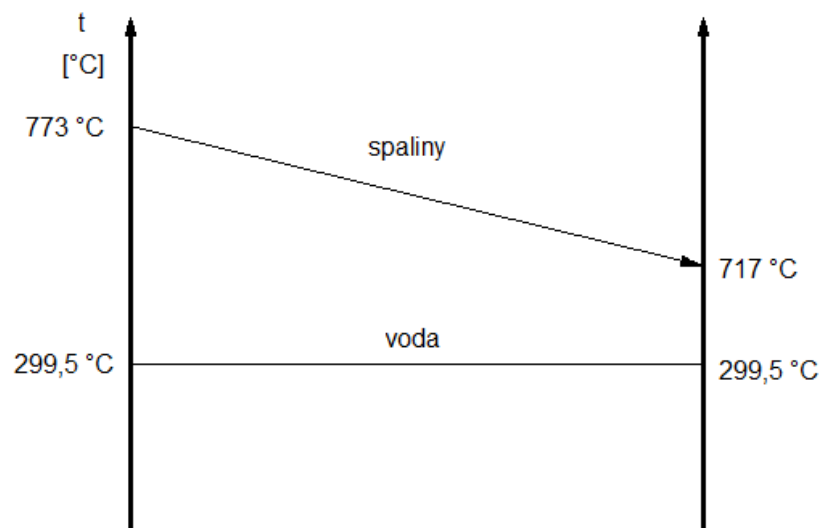
$$I_{\text{mre}}^s = 5335 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Podľa I – t diagramu je teplota spalín za mrežou 773 °C čo sa od zvolenej teploty líši o 3 °C teda o 0,38 %.

8 Výpočet II. ťahu kotla

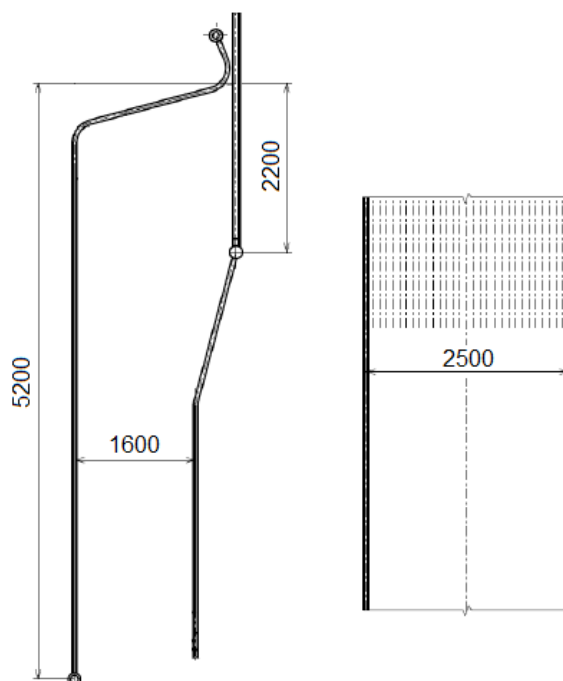
Druhý ťah tvorí membránová stena ktorá je časťou výparníka.

Obr. 8.1 Diagram teplôt II. ťahu kotla



predná stena	$a = 2,5 \text{ m}$
bočná stena	$b = 1,6 \text{ m}$
výška mreže	$c = 2,2 \text{ m}$
výška II. ťahu	$h = 5,2 \text{ m}$

Obr. 8.2 Rozmery II. ťahu kotla



Teplota spalín na vstupe $t_1 = 773 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Teplota spalín na výstupe $t_2 = 717 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Entalpia spalín na vstupe $l_{mre}^s = 5336 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

Entalpia spalín na výstupe $l_{ll}^s = 4914 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

Stredná teplota spalín II. ťahu kotla:

$$t_{str} = \frac{t_1 + t_2}{2} \text{ } [^{\circ}\text{C}] \quad (8.1)$$

$$t_{str} = \frac{773 + 717}{2}$$

$$t_{str} = 745 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Skutočná rýchlosť spalín:

$$w_s = \frac{V_s}{a \cdot b} \cdot \frac{273,15 + t_{str}}{273,15} \text{ } [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (8.2)$$

$$w_s = \frac{8,242}{2,5 \cdot 1,6} \cdot \frac{273,15 + 745}{273,15}$$

$$w_s = 7,680 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Obvod spalínovodu:

$$O = 2 \cdot (a + b) \text{ } [\text{m}] \quad (8.3)$$

$$O = 2 \cdot (2,5 + 1,6)$$

$$O = 8 \text{ m}$$

Ekvivalentný priemer spalínovodu:

$$d_{ek} = \frac{4 \cdot a \cdot b}{O} \text{ } [\text{m}] \quad (8.4)$$

$$d_{ek} = \frac{4 \cdot 2,5 \cdot 1,6}{8}$$

$$d_{ek} = 2 \text{ m}$$

Objem sálavej vrstvy II. ťahu:

$$V = h \cdot a \cdot b \text{ } [\text{m}^3] \quad (8.5)$$

$$V = 5,2 \cdot 2,5 \cdot 1,6$$

$$V = 20,8 \text{ m}^3$$

Projekčný povrch stien II. ťahu kotla:

$$S_{proj} = 2 \cdot (a \cdot b + a \cdot h + b \cdot h) \text{ } [\text{m}^2] \quad (8.6)$$

$$S_{proj} = 2 \cdot (2,5 \cdot 1,6 + 2,5 \cdot 5,2 + 1,6 \cdot 5,2)$$

$$S_{proj} = 50,64 \text{ m}^2$$

Účinná sálavá výhrevná plocha:

Uhlový súčiniteľ osálenia plochy volím $\varphi_{os} = 0,95$.

$$S_{us} = (S_{proj} - a \cdot c - a \cdot b) \cdot \varphi_{os} \text{ } [\text{m}^2] \quad (8.7)$$

$$S_{us} = (50,64 - 2,5 \cdot 2,2 - 2,5 \cdot 1,6) \cdot 0,95$$

$$S_{us} = 39,083 \text{ m}^2$$

Efektívna sálavá hrúbka:

$$s = 3,6 \frac{V}{S_{\text{proj}}} \text{ [m]} \quad (8.8)$$

$$s = 3,6 \frac{20,8}{50,64}$$

$$s = 1,478 \text{ m}$$

Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou:

Hodnoty pre strednú teplotu 745 °C:

$$\text{Súčiniteľ tepelnej vodivosti spalín} \quad \lambda_s = 8,578 \cdot 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\text{Kinematická viskozita} \quad \nu_s = 118,995 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{Prandtlovo číslo} \quad \text{Pr} = 0,606$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda_s}{d_{\text{ek}}} \cdot \left(\frac{w_s \cdot d_{\text{ek}}}{\nu_s} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (8.9)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{8,578 \cdot 10^{-2}}{2} \cdot \left(\frac{7,680 \cdot 2}{118,995 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,606^{0,4}$$

$$\alpha_k = 9,902 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Súčiniteľ oslabenia sálania popolčekovými časticami:

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_{\text{str}} + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}} \text{ [m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}] \quad (8.10)$$

$$k_p = \frac{5,7 \cdot 10^4}{\sqrt[3]{(745 + 273,15)^2 \cdot 20^2}}$$

$$k_p = 76,438 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Súčiniteľ oslabenia sálania trojatómovými plynmi a vodnými parami:

$$k_s \cdot \omega_c = \left(\frac{2,49 + 5,11 \cdot \omega_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{p_c} \cdot s} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_{\text{str}} + 273,15}{1000} \right) \cdot \omega_c \text{ [m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}] \quad (8.11)$$

$$k_s = \left(\frac{2,49 + 5,11 \cdot 0,219}{\sqrt{0,0341} \cdot 1,478} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{745 + 273,15}{1000} \right)$$

$$k_s = 9,384 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Optická hustota spalín:

$$k \cdot p \cdot s = (k_s \cdot \omega_c + k_p \cdot \mu_{pk}) \cdot p \cdot s \quad (8.12)$$

$$k \cdot p \cdot s = (9,384 \cdot 0,341 + 76,438 \cdot 0,0003819) \cdot 0,1 \cdot 1,478$$

$$k \cdot p \cdot s = 0,477$$

Efektívny stupeň čiernosti prúdu spalín:

$$a_{\text{sn}} = 1 - e^{-kps} \quad (8.13)$$

$$a_{\text{sn}} = 1 - e^{-0,477}$$

$$a_{\text{sn}} = 0,379$$

Predbežné teplo odovzdané spalinami II. ťahu kotla:

$$Q_{II, pr} = (I_{mre}^s - I_{II,}^s) \cdot M_{pv} \text{ [kW]} \quad (8.14)$$

$$Q_{II, pr} = (5336 - 4914) \cdot 1,876$$

$$Q_{II, pr} = 791,672 \text{ kW}$$

Predbežné tepelné zaťaženie II. ťahu kotla:

$$q_{II, pr} = \frac{Q_{II, pr}}{S_{us}} \cdot 10^3 \text{ [kW} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (8.15)$$

$$q_{II, pr} = \frac{791,672}{39,083} \cdot 10^3$$

$$q_{II, pr} = 20256,172 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$$

Teplota zaneseného povrchu rúr:

Súčiniteľ zanesenia volím $\varepsilon = 0,0045 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$.

$$t_{za} = t_{syt} + \varepsilon \cdot q_{II, pr} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (8.16)$$

$$t_{za} = 299,5 + 0,0045 \cdot 20256,172$$

$$t_{za} = 390,652 \text{ }^\circ\text{C}$$

Súčiniteľ prestupu tepla sálaním:

Stupeň čiernosti zanesených stien sálavých plôch volím $a_{za} = 0,8$.

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{za} + 1}{2} \cdot a_{sn} \cdot (t_{str} + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{t_{za} + 273,15}{t_{str} + 273,15}\right)^4}{1 - \frac{t_{za} + 273,15}{t_{str} + 273,15}} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (8.17)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,379 \cdot (745 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{390,652 + 273,15}{745 + 273,15}\right)^4}{1 - \frac{390,652 + 273,15}{745 + 273,15}}$$

$$\alpha_{sal} = 48,308 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Celkový súčiniteľ prestupu tepla:

Súčiniteľ omývania volím $\omega = 0,95$.

$$\alpha_s = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_{sal}) \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (8.18)$$

$$\alpha_s = 0,95 \cdot (9,902 + 48,308)$$

$$\alpha_s = 55,299 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Súčiniteľ prestupu tepla:

Súčiniteľ zanesenia volím $\varepsilon = 0,0037 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$.

$$k = \frac{\alpha_s}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_s} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (8.19)$$

$$k = \frac{55,299}{1 + 0,0037 \cdot 55,299}$$

$$k = 45,906 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Logaritmický rozdiel teplôt:

$$\Delta t_1 = t_1 - t_{\text{sy}} [\text{°C}] \quad (8.20)$$

$$\Delta t_1 = 773 - 299,5$$

$$\Delta t_1 = 473,5 \text{ °C}$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_{\text{sy}} [\text{°C}] \quad (8.21)$$

$$\Delta t_2 = 717 - 299,5$$

$$\Delta t_2 = 417,5 \text{ °C}$$

$$\Delta t_{\text{ln}} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} [\text{°C}] \quad (8.22)$$

$$\Delta t_{\text{ln}} = \frac{473,5 - 417,5}{\ln \frac{473,5}{417,5}}$$

$$\Delta t_{\text{ln}} = 444,912 \text{ °C}$$

Teplo odobrané II. ťahom kotla spalínám:

$$Q_{\text{II.}} = k \cdot S \cdot \Delta t_{\text{ln}} \cdot 10^{-3} [\text{kW}] \quad (8.23)$$

$$Q_{\text{II.}} = 45,906 \cdot 39,083 \cdot 444,912 \cdot 10^{-3}$$

$$Q_{\text{II.}} = 798,236 \text{ kW}$$

Teplo spalín na vstupe:

$$Q_{\text{in}} = I_{\text{mre}}^s \cdot M_{\text{pv}} [\text{kW}] \quad (8.24)$$

$$Q_{\text{in}} = 5336 \cdot 1,876$$

$$Q_{\text{in}} = 10010,336 \text{ kW}$$

Teplo spalín na výstupe:

$$Q_{\text{out}} = Q_{\text{in}} - Q_{\text{II.}} [\text{kW}] \quad (8.25)$$

$$Q_{\text{out}} = 10010,336 - 798,236$$

$$Q_{\text{out}} = 9212,1 \text{ kW}$$

Entalpia spalín za II. ťahom kotla:

$$I_{\text{II.}}^s = \frac{Q_{\text{out}}}{M_{\text{pv}}} [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (8.26)$$

$$I_{\text{II.}}^s = \frac{9212,1}{1,876}$$

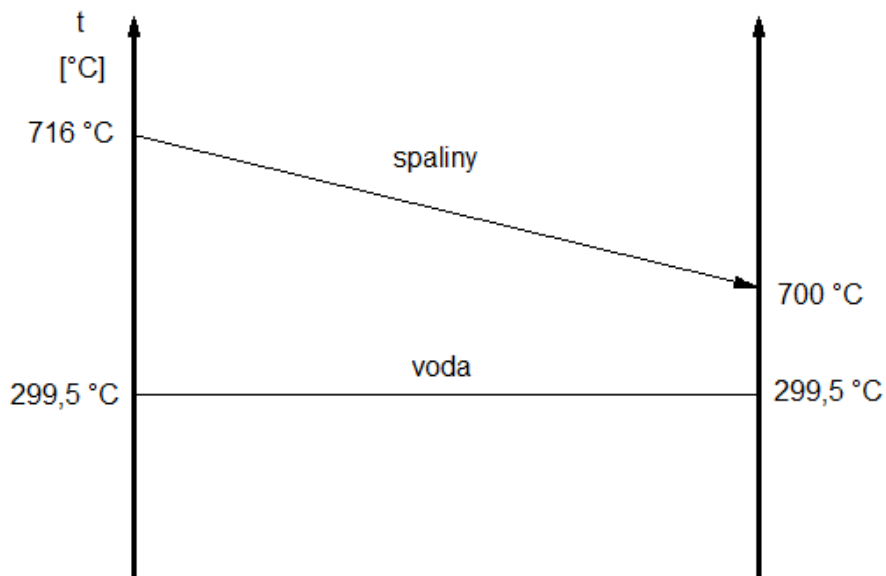
$$I_{\text{II.}}^s = 4910,501 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Podľa I – t diagramu je teplota spalín za II. ťahom kotla 716 °C čo sa od zvolenej teploty líši o 1 °C teda o 0,13 %.

9 Výpočet výsypky medzi II. a III. ťahom

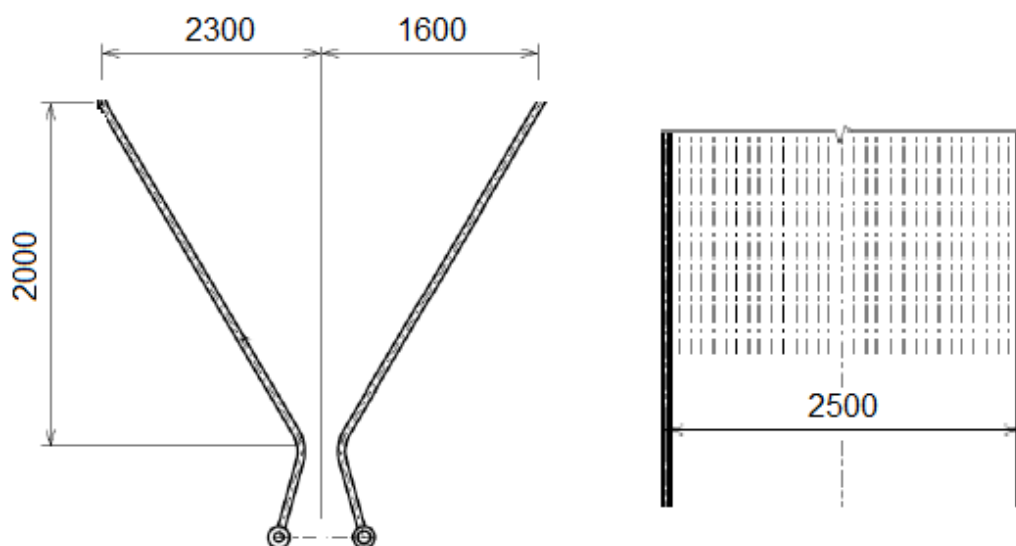
Výsypku medzi druhým tretím ťahom tvorí membránová stena ktorá je časťou výparníka.

Obr. 9.1 Diagram teplôt výsypky medzi II. a III. ťahom kotla



predná stena	$a = 2,5 \text{ m}$
bočná stena 1	$b_1 = 1,6 \text{ m}$
bočná stena 2	$b_2 = 2,3 \text{ m}$
výška výsypky	$h = 2 \text{ m}$

Obr. 9.2 Rozmery výsypky medzi II. a III. tretím ťahom kotla



Teplota spalín na vstupe	$t_1 = 716 \text{ °C}$
Teplota spalín na výstupe	$t_2 = 700 \text{ °C}$

Entalpia spalín na vstupe $I_{II.}^s = 4910 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

Entalpia spalín na výstupe $I_{vys}^s = 4786 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

Stredná teplota spalín výsypky medzi II. a III. ťahom:

$$t_{str} = \frac{t_1 + t_2}{2} [^{\circ}\text{C}] \quad (9.1)$$

$$t_{str} = \frac{716 + 700}{2}$$

$$t_{str} = 708 ^{\circ}\text{C}$$

Stredný obvod spalínovodu:

$$O = \frac{2 \cdot (a + b_1) + 2 \cdot (a + b_2)}{2} [\text{m}] \quad (9.2)$$

$$O = \frac{2 \cdot (2,5 + 1,6) + 2 \cdot (2,5 + 2,3)}{2}$$

$$O = 8,9 \text{ m}$$

Stredný prierez spalínovodu:

$$F_s = \frac{2 \cdot (a \cdot b_1) \cdot (a \cdot b_2)}{a \cdot b_1 + a \cdot b_2} [\text{m}^2] \quad (9.3)$$

$$F_s = \frac{2 \cdot (2,5 \cdot 1,6) \cdot (2,5 \cdot 2,3)}{2,5 \cdot 1,6 + 2,5 \cdot 2,3}$$

$$F_s = 4,717 \text{ m}^2$$

Ekvivalentný priemer spalínovodu:

$$d_{ek} = \frac{4 \cdot F_s}{O} [\text{m}] \quad (9.4)$$

$$d_{ek} = \frac{4 \cdot 4,717}{8,9}$$

$$d_{ek} = 2,12 \text{ m}$$

Skutočná rýchlosť spalín:

$$w_s = \frac{V_s}{F_s} \cdot \frac{273,15 + t_{str}}{273,15} [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (9.5)$$

$$w_s = \frac{8,241}{4,717} \cdot \frac{273,15 + 708}{273,15}$$

$$w_s = 6,275 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Objem sálavej vrstvy výsypky medzi II. a III. ťahom:

$$V = \frac{(b_1 + b_2) \cdot h}{2} \cdot a [\text{m}^3] \quad (9.6)$$

$$V = \frac{(1,6 + 2,3) \cdot 2}{2} \cdot 2,5$$

$$V = 9,75 \text{ m}^3$$

Projekčný povrch stien výsypky medzi II. a III. ťahom:

$$S_{\text{proj}} = (b_1 + b_2) \cdot h + \sqrt{h^2 + b_1^2} \cdot a + \sqrt{h^2 + b_2^2} \cdot a + (b_1 + b_2) \cdot a \quad [\text{m}^2] \quad (9.7)$$

$$S_{\text{proj}} = (1,6 + 2,3) \cdot 2 + \sqrt{2^2 + 1,6^2} \cdot 2,5 + \sqrt{2^2 + 2,3^2} \cdot 2,5 + (1,6 + 2,3) \cdot 2,5$$

$$S_{\text{proj}} = 31,572 \text{ m}^2$$

Účinná sálavá výhrevná plocha:

Uhlový súčiniteľ osálenia plochy volím $\varphi_{\text{os}} = 0,95$.

$$S_{\text{us}} = (S_{\text{proj}} - (b_1 + b_2) \cdot a) \cdot \varphi_{\text{os}} \quad [\text{m}^2] \quad (9.8)$$

$$S_{\text{us}} = (31,572 - (1,6 + 2,3) \cdot 2,5) \cdot 0,95$$

$$S_{\text{us}} = 20,731 \text{ m}^2$$

Efektívna sálavá hrúbka:

$$s = 3,6 \frac{V}{S_{\text{proj}}} \quad [\text{m}] \quad (9.9)$$

$$s = 3,6 \frac{9,75}{31,572}$$

$$s = 1,111 \text{ m}$$

Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou:

Hodnoty pre strednú teplotu 708 °C:

$$\text{Súčiniteľ tepelnej vodivosti spalín} \quad \lambda_s = 8,344 \cdot 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\text{Kinematická viskozita} \quad \nu_s = 113,774 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{Prandtlovo číslo} \quad \text{Pr} = 0,609$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda_s}{d_{\text{ek}}} \cdot \left(\frac{w_s \cdot d_{\text{ek}}}{\nu_s} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (9.10)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{8,344 \cdot 10^{-2}}{2,12} \cdot \left(\frac{6,275 \cdot 2,12}{113,774 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,609^{0,4}$$

$$\alpha_k = 8,412 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Súčiniteľ oslabenia sálenia popolčekomými časticami:

$$k_p \cdot \mu_{\text{pk}} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{\text{pk}}}{\sqrt[3]{(t_{\text{str}} + 273,15)^2 \cdot d_{\text{pk}}^2}} \quad [\text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}] \quad (9.11)$$

$$k_p = \frac{5,7 \cdot 10^4}{\sqrt[3]{(708 + 273,15)^2 \cdot 20^2}}$$

$$k_p = 78,348 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Súčiniteľ oslabenia sáľania trojatómovými plynmi a vodnými parami:

$$k_s \cdot \omega_c = \left(\frac{2,49 + 5,11 \cdot \omega_{H_2O}}{\sqrt{p_c \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_{str} + 273,15}{1000} \right) \cdot \omega_c \text{ [m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}] \quad (9.12)$$

$$k_s = \left(\frac{2,49 + 5,11 \cdot 0,219}{\sqrt{0,0341 \cdot 1,011}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{708 + 273,15}{1000} \right)$$

$$k_s = 6,579 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Optická hustota spalín:

$$k \cdot p \cdot s = (k_s \cdot \omega_c + k_p \cdot \mu_{pk}) \cdot p \cdot s \quad (9.13)$$

$$k \cdot p \cdot s = (6,579 \cdot 0,341 + 78,348 \cdot 0,0003819) \cdot 0,1 \cdot 1,111$$

$$k \cdot p \cdot s = 0,252$$

Efektívny stupeň čiernosti prúdu spalín:

$$a_{sn} = 1 - e^{-kps} \quad (9.14)$$

$$a_{sn} = 1 - e^{-0,252}$$

$$a_{sn} = 0,222$$

Predbežné teplo odovzdané spalínami výsyvky medzi II. a III. ťahom:

$$Q_{vys pr} = (I_{II}^s - I_{vys}^s) \cdot M_{pv} \text{ [kW]} \quad (9.15)$$

$$Q_{vys pr} = (4910 - 4786) \cdot 1,876$$

$$Q_{vys pr} = 232,624 \text{ kW}$$

Predbežné tepelné zaťaženie výsyvky medzi II. a III. ťahom:

$$q_{vys pr} = \frac{Q_{vys pr}}{S_{us}} \cdot 10^3 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (9.16)$$

$$q_{vys pr} = \frac{232,624}{20,731} \cdot 10^3$$

$$q_{vys pr} = 11221,069 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Teplota zaneseného povrchu rúr:

Súčiniteľ zanesenia volím $\varepsilon = 0,0045 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$.

$$t_{za} = t_{sy} + \varepsilon \cdot q_{vys pr} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (9.17)$$

$$t_{za} = 299,5 + 0,0045 \cdot 11221,069$$

$$t_{za} = 349,994 \text{ }^\circ\text{C}$$

Súčiniteľ prestupu tepla sálaním:

Stupeň čiernosti zanesených stien sálavých plôch volím $a_{za} = 0,8$.

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{za} + 1}{2} \cdot a_{sn} \cdot (t_{str} + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{t_{za} + 273,15}{t_{str} + 273,15}\right)^4}{1 - \frac{t_{za} + 273,15}{t_{str} + 273,15}} [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (9.18)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,222 \cdot (708 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{349,994 + 273,15}{708 + 273,15}\right)^4}{1 - \frac{349,994 + 273,15}{708 + 273,15}}$$

$$\alpha_{sal} = 24,683 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$$

Celkový súčiniteľ prestupu tepla:

Súčiniteľ omývania volím $\omega = 0,8$.

$$\alpha_s = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_{sal}) [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (9.19)$$

$$\alpha_s = 0,8 \cdot (8,412 + 24,683)$$

$$\alpha_s = 26,476 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$$

Súčiniteľ prestupu tepla:

Súčiniteľ zanesenia volím $\varepsilon = 0,0045 m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$.

$$k = \frac{\alpha_s}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_s} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (9.20)$$

$$k = \frac{26,476}{1 + 0,0045 \cdot 26,476}$$

$$k = 23,657 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

Logaritmickej rozdiel teplôt:

$$\Delta t_1 = t_1 - t_{syt} [^{\circ}C] \quad (9.21)$$

$$\Delta t_1 = 716 - 299,5$$

$$\Delta t_1 = 416,5 ^{\circ}C$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_{syt} [^{\circ}C] \quad (9.22)$$

$$\Delta t_2 = 700 - 299,5$$

$$\Delta t_2 = 400,5 ^{\circ}C$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} [^{\circ}C] \quad (9.23)$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{416,5 - 400,5}{\ln \frac{416,5}{400,5}}$$

$$\Delta t_{ln} = 408,447 ^{\circ}C$$

Tepló odobrané výsypkou medzi II. a III. ťahom spalínám:

$$Q_{vys} = k \cdot S \cdot \Delta t_{in} \cdot 10^{-3} \text{ [kW]} \quad (9.24)$$

$$Q_{vys} = 23,657 \cdot 20,731 \cdot 408,447 \cdot 10^{-3}$$

$$Q_{vys} = 200,315 \text{ kW}$$

Tepló spalín na vstupe:

$$Q_{in} = I_{II}^s \cdot M_{pv} \text{ [kW]} \quad (9.25)$$

$$Q_{in} = 4910 \cdot 1,876$$

$$Q_{in} = 9221,16 \text{ kW}$$

Tepló spalín na výstupe:

$$Q_{out} = Q_{in} - Q_{vys} \text{ [kW]} \quad (9.26)$$

$$Q_{out} = 9221,16 - 200,315$$

$$Q_{out} = 9010,845 \text{ kW}$$

Entalpia spalín za výsypkou medzi II. a III. ťahom kotla:

$$I_{vys}^s = \frac{Q_{out}}{M_{pv}} \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (9.27)$$

$$I_{vys}^s = \frac{9010,845}{1,876}$$

$$I_{vys}^s = 4803,222 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

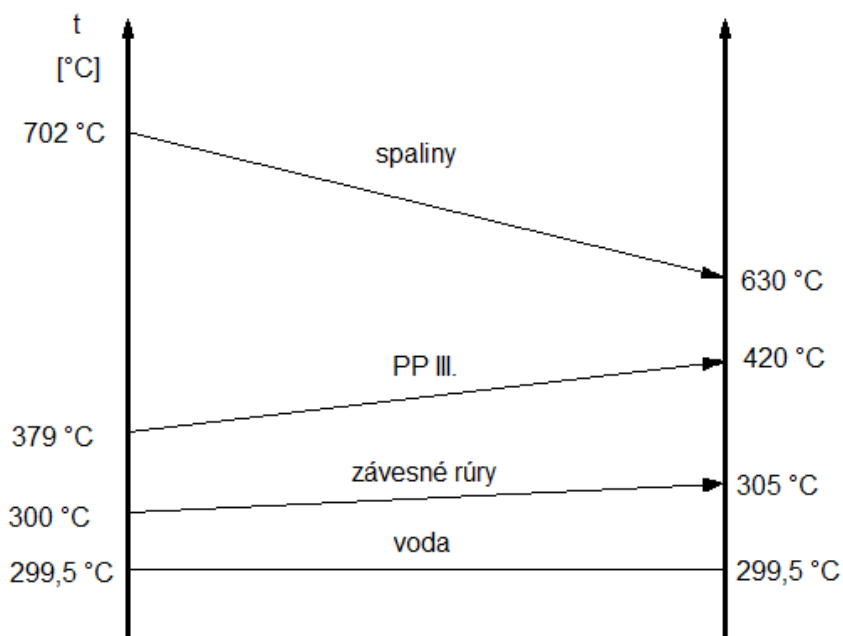
Podľa I – t diagramu je teplota spalín za výsypkou medzi II. a III. ťahom kotla 702 °C čo sa od zvolenej teploty líši o 2 °C teda o 0,28 %.

10 Výpočet III. ťahu

10.1 Prvá časť III. ťahu

Prvá časť III. ťahu je zložená z prehrievača pary 3, závesných rúr a membránovej steny.

Obr. 10.1 Diagram teplôt 1. časti III. ťahu



Teplota spalín na vstupe

$$t_1 = 702 \text{ °C}$$

Teplota spalín na výstupe

$$t_2 = 630 \text{ °C}$$

Entalpia spalín na vstupe

$$i_{vys}^s = 4803 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Entalpia spalín na výstupe

$$i_{1. III.}^s = 4268 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Teplota pary na vstupe

$$t_{PP3}^{in} = 379 \text{ °C}$$

Teplota pary na výstupe

$$t_{PP3}^{out} = 420 \text{ °C}$$

Entalpia pary na vstupe

$$i_{vys}^s = 3076 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Entalpia pary na výstupe

$$i_{PP3}^s = 3194 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Špecifický objem pary na vstupe

$$v_{in} = 0,03612 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Špecifický objem pary na výstupe

$$v_{out} = 0,032168 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Stredná teplota spalín:

$$t_{str} = \frac{t_1 + t_2}{2} \text{ [°C]}$$

(10.1 - 1)

$$t_{str} = \frac{702 + 630}{2}$$

$$t_{str} = 666 \text{ °C}$$

Stredný objem pary:

$$v_p = \frac{v_{in} + v_{out}}{2} [^{\circ}\text{C}] \quad (10.1 - 2)$$

$$v_p = \frac{0,0361 + 0,0321}{2}$$

$$v_p = 0,0341 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Stredná teplota pary v PP3:

$$t_{pstr} = \frac{t_{PP3}^{in} + t_{PP3}^{out}}{2} [^{\circ}\text{C}] \quad (10.1 - 3)$$

$$t_{pstr} = \frac{397,1 + 420}{2}$$

$$t_{pstr} = 408,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Geometria III. ťahu:

predná stena a = 2,5 m

bočná stena b = 2,9 m

10.1.1 Hlavná výhrevná plocha PP3

Prehrievač pary PP3 je konštruovaný z rúr 38 x 4,5 ako jednohad. Závesné rúry sú konštruované z rúr 38 x 5 a slúžia ako chladený záves prehrievača pary PP3. Usporiadanie rúr prehrievača pary PP3 je za sebou z dôvodu zábrany väčšieho zanášania rúr, taktiež je väčší priečny a pozdĺžny rozostúp rúr z dôvodu vyššieho zaťaženia teplotou spalín.

Vonkajší priemer rúr D = 0,038 m

Vnútorý priemer rúr d = 0,029 m

Priečny rozostúp s₁ = 0,17 m

Pozdĺžny rozostúp s₂ = 0,1 m

Počet rúr v rade z₁ = 14

Počet radov z₂ = 12

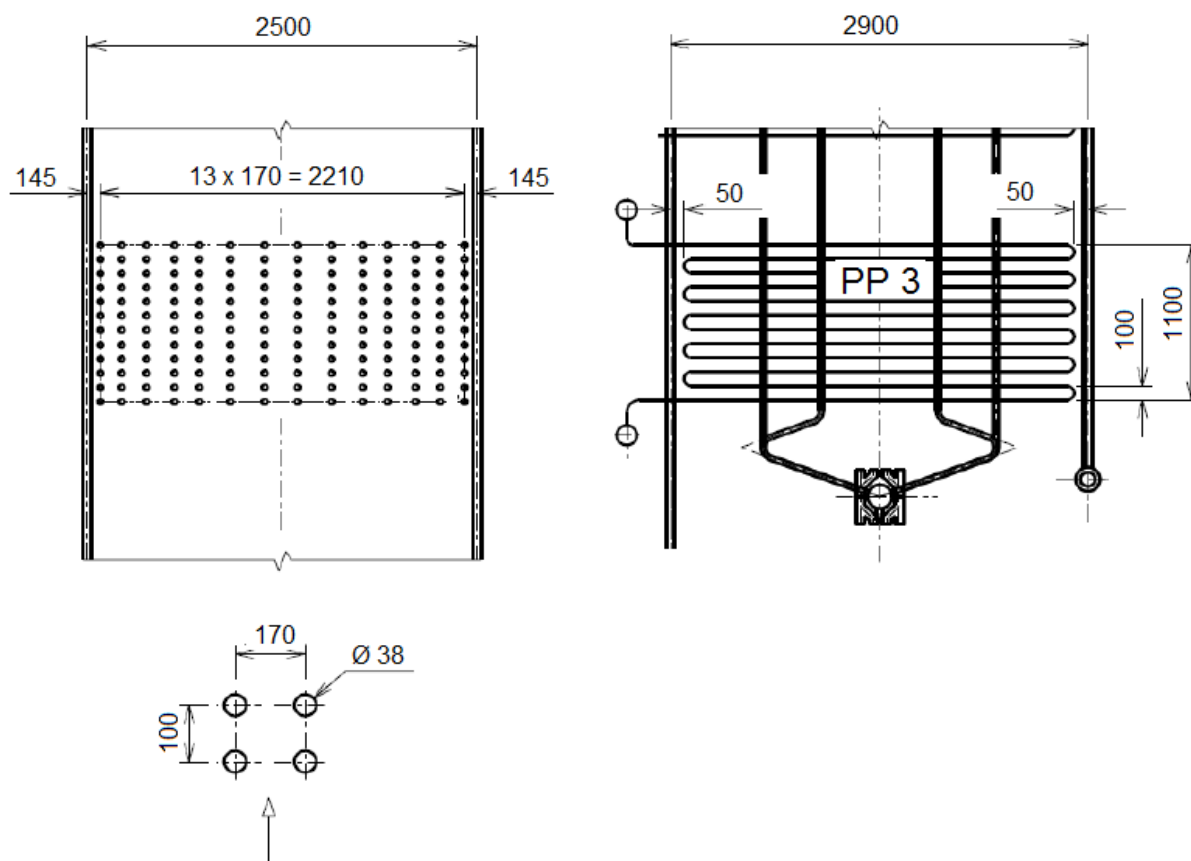
Počet hadov n = 1

Výška h = 1,1

Počet závesných rúr i = 20

Rozmer závesných rúr 38 x 5

Obr. 9.2 Konštrukčná charakteristika prehrievača pary č.3



Priečna plocha zväzku a závesných rúr:

$$S_{tr} = D \cdot l_e \cdot z_1 + i \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad [m^2] \quad (10.1 - 4)$$

$$S_{tr} = 0,038 \cdot 2,8 \cdot 14 + 20 \cdot \frac{\pi \cdot 0,038^2}{4}$$

$$S_{tr} = 1,512 \, m^2$$

Svetlý prierez spalín:

$$S_{sp} = a \cdot b - S_{tr} \quad [m^2] \quad (10.1 - 5)$$

$$S_{sp} = 2,5 \cdot 2,9 - 1,512$$

$$S_{sp} = 5,737 \, m^2$$

Rýchlosť pary v rúrach prehrievača pary PP3:

$$w_p = \frac{4 \cdot M_{pp} \cdot v_p}{z_1 \cdot \pi \cdot d^2} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (10.1 - 6)$$

$$w_p = \frac{4 \cdot 6,11 \cdot 0,0341}{14 \cdot \pi \cdot 0,029^2}$$

$$w_p = 22,531 \, m \cdot s^{-1}$$

Rýchlosť spalín:

$$w_s = \frac{V_s}{S_{sp}} \cdot \frac{273,15 + t_{str}}{273,15} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (10.1 - 7)$$

$$w_s = \frac{8,242}{5,737} \cdot \frac{273,15 + 666}{273,15}$$

$$w_s = 4,939 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou na strane pary:

Hodnoty pre teplotu pary 408,5 °C:

$$\text{Merná tepelná vodivosť} \quad \lambda_p = 0,0648 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\text{Dynamická viskozita} \quad \eta_p = 2,539 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{Prandtlovo číslo} \quad Pr_p = 1,138$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d}{\eta_p \cdot v_p} \right)^{0,8} \cdot Pr_p^{0,4} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (10.1 - 8)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,0648}{0,029} \cdot \left(\frac{22,531 \cdot 0,029}{2,539 \cdot 10^{-5} \cdot 0,0341} \right)^{0,8} \cdot 1,138^{0,4}$$

$$\alpha_k = 2726,282 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou na strane spalín:

Hodnoty pre strednú teplotu 666 °C:

$$\text{Súčiniteľ tepelnej vodivosti spalín} \quad \lambda_s = 7,93 \cdot 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\text{Kinematická viskozita} \quad \nu_s = 104,704 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{Prandtlovo číslo} \quad Pr = 0,614$$

Nakoľko je počet radov rúr prehrievača pary PP3 z_2 väčší ako 10 je korekcia na počet radov rúr $C_z = 1$. Taktiež korekcia na geometrickú konfiguráciu zväzku $C_s = 1$ keďže $\sigma_{pz} = \frac{s_2}{d}$ je väčšie ako 2.

$$\alpha_k = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left(\frac{w_s \cdot D}{\nu_s} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (10.1 - 9)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{7,93 \cdot 10^{-2}}{0,038} \cdot \left(\frac{4,939 \cdot 0,038}{104,704 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,65} \cdot 0,614^{0,33}$$

$$\alpha_k = 46,276 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Súčiniteľ oslabenia sálania popolčekomými časticami:

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_{str} + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}} \text{ [m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}] \quad (10.1 - 10)$$

$$k_p = \frac{5,7 \cdot 10^4}{\sqrt[3]{(666 + 273,15)^2 \cdot 20^2}}$$

$$k_p = 80,667 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Efektívna hrúbka sálavej vrstvy:

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) [\text{m}] \quad (10.1 - 11)$$

$$s = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,17 \cdot 0,1}{0,038^2} - 1 \right)$$

$$s = 0,478 \text{ m}$$

Výrobná teplovýmenná plocha:

$$S = \pi \cdot D \cdot l_e \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot n [\text{m}^2] \quad (10.1 - 12)$$

$$S = \pi \cdot 0,038 \cdot 2,8 \cdot 14 \cdot 12 \cdot 1$$

$$S = 56,156 \text{ m}^2$$

Teplota zaneseného povrchu rúr na strane spalín:

Súčiniteľ zanesenia volím $\varepsilon = 0,0065 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$.

$$t_{za} = t_{pstr} + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_k} \right) \cdot \frac{Q_{pp3}}{S} \cdot 10^3 [^\circ\text{C}] \quad (10.1 - 13)$$

$$t_{za} = 408,5 + \left(0,0065 + \frac{1}{2726} \right) \cdot \frac{716,53}{56,156} \cdot 10^3$$

$$t_{za} = 496,118 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Súčiniteľ oslabenia sálania trojatómovými plynmi a vodnými parami:

$$k_s \cdot \omega_c = \left(\frac{2,49 + 5,11 \cdot \omega_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{p_c \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_{str} + 273,15}{1000} \right) \cdot \omega_c [\text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}] \quad (10.1 - 14)$$

$$k_s = \left(\frac{2,49 + 5,11 \cdot 0,219}{\sqrt{0,0341 \cdot 0,478}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{666 + 273,15}{1000} \right)$$

$$k_s = 17,780 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Optická hustota spalín:

$$k \cdot p \cdot s = (k_s \cdot \omega_c + k_p \cdot \mu_{pk}) \cdot p \cdot s \quad (10.1 - 15)$$

$$k \cdot p \cdot s = (17,780 \cdot 0,341 + 80,667 \cdot 0,0003819) \cdot 0,1 \cdot 0,478$$

$$k \cdot p \cdot s = 0,291$$

Stupeň čiernosti prúdu spalín:

$$a = 1 - e^{-kps} \quad (10.1 - 16)$$

$$a = 1 - e^{-0,291}$$

$$a = 0,252$$

Súčiniteľ prestupu tepla sálaním:

Stupeň čiernosti zanesených stien sálavých plôch volím $a_{za} = 0,8$.

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{za} + 1}{2} \cdot a \cdot (t_{str} + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{t_{za} + 273,15}{t_{str} + 273,15}\right)^4}{1 - \frac{t_{za} + 273,15}{t_{str} + 273,15}} [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (10.1 - 17)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,252 \cdot (666 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{496,118 + 273,15}{666 + 273,15}\right)^4}{1 - \frac{496,118 + 273,15}{666 + 273,15}}$$

$$\alpha_{sal} = 32,549 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$$

Celkový súčiniteľ prestupu tepla:

Súčiniteľ omývania volím $\omega = 1$.

$$\alpha_s = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_{sal}) [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (10.1 - 18)$$

$$\alpha_s = 1 \cdot (46,276 + 32,549)$$

$$\alpha_s = 78,825 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$$

Súčiniteľ prestupu tepla:

$$k = \frac{\alpha_s}{1 + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_k}\right) \cdot \alpha_s} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (10.1 - 19)$$

$$k = \frac{78,825}{1 + \left(0,0065 + \frac{1}{2726}\right) \cdot 78,825}$$

$$k = 51,142 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

Logaritmickej rozdiel teplôt:

$$\Delta t_1 = t_1 - t_{PP3}^{in} [^{\circ}C] \quad (10.1 - 20)$$

$$\Delta t_1 = 702 - 379$$

$$\Delta t_1 = 323 ^{\circ}C$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_{PP3}^{out} [^{\circ}C] \quad (10.1 - 21)$$

$$\Delta t_2 = 630 - 420$$

$$\Delta t_2 = 210 ^{\circ}C$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} [^{\circ}C] \quad (10.1 - 22)$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{323 - 210}{\ln \frac{323}{210}}$$

$$\Delta t_{ln} = 262,458 ^{\circ}C$$

Veľkosť výhrevnej plochy:

$$S_{PP3} = \frac{Q_{PP3}}{k \cdot \Delta t_{ln}} \cdot 10^3 \text{ [m}^2\text{]} \quad (10.1 - 23)$$

$$S_{PP3} = \frac{716,532}{51,142 \cdot 262,458} \cdot 10^3$$

$$S_{PP3} = 53,382 \text{ m}^2$$

Veľkosť výhrevných plôch sa od seba líši o 4,93%.

10.1.2 Výpočet membránovej steny

Obvod spalínovodu:

$$O = 2 \cdot (a + b) + i \cdot \pi \cdot D + 2 \cdot z_1 \cdot (l_e + D) \text{ [m]} \quad (10.1 - 24)$$

$$O = 2 \cdot (2,5 + 2,9) + 20 \cdot \pi \cdot 0,038 + 2 \cdot 14 \cdot (2,8 + 0,038)$$

$$O = 92,651 \text{ m}$$

Ekvivalentný priemer spalínovodu:

$$d_{ek} = \frac{4 \cdot S_{sp}}{O} \text{ [m]} \quad (10.1 - 25)$$

$$d_{ek} = \frac{4 \cdot 5,737}{92,651}$$

$$d_{ek} = 0,247 \text{ m}$$

Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou:

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda_s}{d_{ek}} \cdot \left(\frac{w_s \cdot d_{ek}}{v_p} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{]} \quad (10.1 - 26)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{7,93 \cdot 10^{-2}}{0,247} \cdot \left(\frac{4,939 \cdot 0,247}{104,704 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,614^{0,4}$$

$$\alpha_k = 10,881 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Súčiniteľ oslabenia sálania popolčekomými časticami:

Súčiniteľ oslabenia sálania popolčekomými časticami membránovej steny v 1. časti III. ťahu je rovnaký ako súčiniteľ oslabenia sálania popolčekomými časticami súbežnej teplovýmennej plochy PP3, teda $k_p = 80,667 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$.

Objem sálavej vrstvy 1. časti III. ťahu:

$$V = a \cdot b \cdot h \text{ [m}^3\text{]} \quad (10.1 - 27)$$

$$V = 2,5 \cdot 2,9 \cdot 1,1$$

$$V = 7,975 \text{ m}^3$$

Projekčný povrch stien 1. časti III. ťahu:

$$S_{proj} = 2 \cdot (a \cdot h + b \cdot h) \text{ [m}^2\text{]} \quad (10.1 - 28)$$

$$S_{proj} = 2 \cdot (2,5 \cdot 1,1 + 2,9 \cdot 1,1)$$

$$S_{proj} = 11,88 \text{ m}^2$$

Efektívna sálavá hrúbka:

$$s = 3,6 \frac{V}{S_{\text{proj}}} \text{ [m]} \quad (10.1 - 29)$$

$$s = 3,6 \frac{7,975}{11,88}$$

$$s = 2,416 \text{ m}$$

Súčiniteľ oslabenia sálania trojatómovými plynmi a vodnými parami:

$$k_s \cdot \omega_c = \left(\frac{2,49 + 5,11 \cdot \omega_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{p_c \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_{\text{str}} + 273,15}{1000} \right) \cdot \omega_c \text{ [m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}] \quad (10.1 - 30)$$

$$k_s = \left(\frac{2,49 + 5,11 \cdot 0,219}{\sqrt{0,0341 \cdot 2,416}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{666 + 273,15}{1000} \right)$$

$$k_s = 7,539 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Optická hustota spalín:

$$k \cdot p \cdot s = (k_s \cdot \omega_c + k_p \cdot \mu_{pk}) \cdot p \cdot s \quad (10.1 - 31)$$

$$k \cdot p \cdot s = (7,539 \cdot 0,341 + 80,667 \cdot 0,0003819) \cdot 0,1 \cdot 2,416$$

$$k \cdot p \cdot s = 0,628$$

Stupeň čiernosti prúdu spalín:

$$a = 1 - e^{-kps} \quad (10.1 - 32)$$

$$a = 1 - e^{-0,628}$$

$$a = 0,466$$

Predbežné teplo odovzdané spalínami výparníku v 1. časti III. ťahu:

$$Q_1 = (I_{\text{vys}}^s - I_{1. \text{ III.}}^s) \cdot M_{pv} - Q_{PP3} - Q_{zr} \text{ [kW]} \quad (10.1 - 33)$$

$$Q_1 = (4803 - 4268) \cdot 1,876 - 716,532 - 60$$

$$Q_1 = 227,128 \text{ kW}$$

Predbežné tepelné zaťaženie 1. časti III. ťahu:

$$q_{pr} = \frac{Q_1}{S_{\text{proj}}} \cdot 10^3 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (10.1 - 34)$$

$$q_{pr} = \frac{227,128}{11,88} \cdot 10^3$$

$$q_{pr} = 19118,518 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Teplota zaneseného povrchu rúr:

$$\text{Súčiniteľ zanesenia volím } \varepsilon = 0,0045 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}.$$

$$t_{za} = t_{\text{syt}} + \varepsilon \cdot q_{pr} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (10.1 - 35)$$

$$t_{za} = 299,5 + 0,0045 \cdot 19118,518$$

$$t_{za} = 385,533 \text{ }^\circ\text{C}$$

Súčiniteľ prestupu tepla sálaním:

Stupeň čiernosti zanesených stien sálavých plôch volím $a_{za} = 0,8$.

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{za} + 1}{2} \cdot a \cdot (t_{str} + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{t_{za} + 273,15}{t_{str} + 273,15}\right)^4}{1 - \frac{t_{za} + 273,15}{t_{str} + 273,15}} [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (10.1 - 36)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,466 \cdot (666 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{385,533 + 273,15}{666 + 273,15}\right)^4}{1 - \frac{385,533 + 273,15}{666 + 273,15}}$$

$$\alpha_{sal} = 50,262 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$$

Celkový súčiniteľ prestupu tepla:

Súčiniteľ omývania volím $\omega = 1$.

$$\alpha_s = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_{sal}) [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (10.1 - 37)$$

$$\alpha_s = 1 \cdot (10,881 + 50,262)$$

$$\alpha_s = 61,143 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$$

Súčiniteľ prestupu tepla:

$$k = \frac{\alpha_s}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_s} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (10.1 - 38)$$

$$k = \frac{61,143}{1 + 0,0045 \cdot 61,143}$$

$$k = 47,949 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

Logaritmický rozdiel teplôt:

$$\Delta t_1 = t_1 - t_{syf} [^{\circ}C] \quad (10.1 - 39)$$

$$\Delta t_1 = 702 - 299,5$$

$$\Delta t_1 = 402,5 ^{\circ}C$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_{syf} [^{\circ}C] \quad (10.1 - 40)$$

$$\Delta t_2 = 630 - 299,5$$

$$\Delta t_2 = 330,5 ^{\circ}C$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} [^{\circ}C] \quad (10.1 - 41)$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{402,5 - 330,5}{\ln \frac{402,5}{330,5}}$$

$$\Delta t_{ln} = 365,318 ^{\circ}C$$

Teplo odobrané výparníkom v 1. časti III. ťahu:

$$Q_{vyp} = k \cdot S \cdot \Delta t_{ln} \cdot 10^{-3} [kW] \quad (10.1 - 42)$$

$$Q_{vyp} = 47,949 \cdot 11,88 \cdot 365,318 \cdot 10^{-3}$$

$$Q_{vyp} = 208,097 kW$$

10.1.3 Výpočet závesných rúr

Teplota pary na vstupe	$t_{zr}^{in} = 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Teplota pary na výstupe	$t_{zr}^{out} = 303 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Tlak pary na vstupe	$p_{zr}^{in} = 8,55 \text{ MPa}$
Tlak pary na výstupe	$p_{zr}^{out} = 8,53 \text{ MPa}$
Entalpia pary na vstupe	$i_{zr}^{in} = 2754,54 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Entalpia pary na výstupe	$i_{zr}^{out} = 2770,49 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Špecifický objem pary na vstupe	$v_{in} = 0,0218 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Špecifický objem pary na výstupe	$v_{out} = 0,0222 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

Stredný objem pary:

$$v_p = \frac{v_{in} + v_{out}}{2} \text{ [}^{\circ}\text{C]} \quad (10.1 - 43)$$

$$v_p = \frac{0,0218 + 0,0222}{2}$$

$$v_p = 0,022 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Stredná teplota pary v závesných rúrach:

$$t_{pstr} = \frac{t_{zr}^{in} + t_{zr}^{out}}{2} \text{ [}^{\circ}\text{C]} \quad (10.1 - 44)$$

$$t_{pstr} = \frac{300 + 303}{2}$$

$$t_{pstr} = 301,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Rýchlosť pary v závesných rúrach:

$$w_p = \frac{4 \cdot (M_{pp} - M_v) \cdot v_p}{i \cdot \pi \cdot d^2} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (10.1 - 45)$$

$$w_p = \frac{4 \cdot (6,11 - 0,3) \cdot 0,022}{20 \cdot \pi \cdot 0,028^2}$$

$$w_p = 10,379 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou na strane pary:

Hodnoty pre teplotu pary 301,5 °C:

$$\text{Merná tepelná vodivosť} \quad \lambda_p = 0,0709 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\text{Dynamická viskozita} \quad \eta_p = 1,995 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{Prandtlovo číslo} \quad Pr_p = 1,3914$$

$$\alpha_k = \alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d}{\eta_p \cdot v_p} \right)^{0,8} \cdot Pr_p^{0,4} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (10.1 - 46)$$

$$\alpha_k = \alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,0709}{0,028} \cdot \left(\frac{10,379 \cdot 0,028}{1,995 \cdot 10^{-5} \cdot 0,022} \right)^{0,8} \cdot 1,3914^{0,4}$$

$$\alpha_k = \alpha_2 = 3015,471 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou na strane spalín:

Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou závesných rúr na strane spalín je rovnaký ako súčiniteľ prestupu tepla na strane spalín teplovýmennej plochy PP3 ktorá je na závesných rúrach zavesená, teda $\alpha_k = 46,276 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Súčiniteľ oslabenia sálania popolčekomými časticami:

Súčiniteľ oslabenia sálania popolčekomými časticami závesných rúr je rovnaký ako súčiniteľ oslabenia sálania popolčekomými časticami teplovýmennej plochy PP3 ktorá je na závesných rúrach zavesená, teda $k_p = 80,667 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$.

Efektívna sálavá hrúbka:

Efektívna sálavá hrúbka závesných rúr je rovnaká ako efektívna sálavá hrúbka teplovýmennej plochy PP3 ktorá je na závesných rúrach zavesená, teda $s = 0,478 \text{ m}$

Súčiniteľ oslabenia sálania trojatómovými plynmi a vodnými parami:

Súčiniteľ oslabenia sálania trojatómovými plynmi a vodnými parami závesných rúr je rovnaký ako súčiniteľ oslabenia sálania trojatómovými plynmi a vodnými parami teplovýmennej plochy PP3 ktorá je na závesných rúrach zavesená, teda $k_s = 17,780 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$.

Optická hustota spalín:

Optická hustota spalín závesných rúr je rovnaká ako optická hustota spalín teplovýmennej plochy PP3 ktorá je na závesných rúrach zavesená teda, $k \cdot p \cdot s = 0,291$

Stupeň čiernosti prúdu spalín:

Stupeň čiernosti prúdu spalín závesných rúr je rovnaký ako stupeň čiernosti prúdu spalín teplovýmennej plochy PP3 ktorá je na závesných rúrach zavesená, teda $a = 0,252$.

Výrobná teplovýmenná plocha:

$$S = \pi \cdot D \cdot h \cdot i \text{ [m}^2\text{]} \quad (10.1 - 47)$$

$$S = \pi \cdot 0,038 \cdot 1,1 \cdot 20$$

$$S = 2,626 \text{ m}^2$$

Predbežne teplo odobrané závesnými rúrami spalinám:

$$Q_1 = (M_{pp} - M_v) \cdot (i_{zr}^{out} - i_{zr}^{in}) \text{ [kW]} \quad (10.1 - 48)$$

$$Q_1 = (6,11 - 0,3) \cdot (2770,49 - 2754,54)$$

$$Q_1 = 92,669 \text{ kW}$$

Teplota zaneseného povrchu rúr na strane spalín:

Súčiniteľ zanesenia volím $\varepsilon = 0,002 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$.

$$t_{za} = t_{Pstr} + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{Q_1}{S} \cdot 10^3 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (10.1 - 49)$$

$$t_{za} = 301,5 + \left(0,002 + \frac{1}{3015,471} \right) \cdot \frac{92,669}{2,626} \cdot 10^3$$

$$t_{za} = 383,780 \text{ }^\circ\text{C}$$

Súčiniteľ prestupu tepla sálaním:

Stupeň čiernosti zanesených stien sálavých plôch volím $a_{za} = 0,8$.

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{za} + 1}{2} \cdot a \cdot (t_{str} + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{t_{za} + 273,15}{t_{str} + 273,15} \right)^4}{1 - \frac{t_{za} + 273,15}{t_{str} + 273,15}} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (10.1 - 50)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,252 \cdot (666 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{383,780 + 273,15}{666 + 273,15} \right)^4}{1 - \frac{383,780 + 273,15}{666 + 273,15}}$$

$$\alpha_{sal} = 27,103 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Celkový súčiniteľ prestupu tepla:

Súčiniteľ omývania volím $\omega = 1$

$$\alpha_s = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_{sal}) \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (10.1 - 51)$$

$$\alpha_s = 1 \cdot (46,276 + 27,103)$$

$$\alpha_s = 73,379 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Súčiniteľ prestupu tepla:

$$k = \frac{\alpha_s}{1 + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_k} \right) \cdot \alpha_s} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (10.1 - 52)$$

$$k = \frac{73,379}{1 + \left(0,002 + \frac{1}{3015,471} \right) \cdot 73,379}$$

$$k = 62,658 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Logaritmický rozdiel teplôt:

$$\Delta t_1 = t_1 - t_{zr}^{in} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (10.1 - 53)$$

$$\Delta t_1 = 702 - 300$$

$$\Delta t_1 = 402 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_{zr}^{out} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (10.1 - 54)$$

$$\Delta t_2 = 630 - 303$$

$$\Delta t_2 = 327 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} [^{\circ}\text{C}] \quad (10.1 - 55)$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{402 - 327}{\ln \frac{402}{327}}$$

$$\Delta t_{ln} = 363,210 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

Tepló odobrané závesnými rúrami:

$$Q_{zr} = k \cdot S \cdot \Delta t_{ln} \cdot 10^{-3} [\text{kW}] \quad (10.1 - 56)$$

$$Q_{zr} = 62,658 \cdot 2,626 \cdot 363,210 \cdot 10^{-3}$$

$$Q_{zr} = 59,762 \text{ kW}$$

Prepočet entalpie výstupnej pary zo závesných rúr:

$$i_{zr}^{out} = \frac{Q_{zr} + (M_{pp} - M_v) \cdot i_{zr}^{in}}{M_{pp} - M_v} [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (10.1 - 57)$$

$$i_{zr}^{out} = \frac{59,762 + (6,11 - 0,3) \cdot 2754,54}{6,11 - 0,3}$$

$$i_{zr}^{out} = 2764,826 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Tejto hodnote entalpie a tlaku zodpovedá teplota 301,5 °C ktorá sa od zvolenej teploty pary na výstupe zo závesných rúr 303 °C líši o 1,5 °C.

Prepočet teploty spalín na výstupe z 1. časti III. ťahu:

Celkové teplo:

$$Q_C = Q_{PP3} + Q_{vyp} + Q_{zr} [\text{kW}] \quad (10.1 - 58)$$

$$Q_C = 716,532 + 208,097 + 59,762$$

$$Q_C = 984,391 \text{ kW}$$

Teplo spalín na vstupe:

$$Q_{in} = I_{vys}^s \cdot M_{pv} [\text{kW}] \quad (10.1 - 59)$$

$$Q_{in} = 4803 \cdot 1,876$$

$$Q_{in} = 9010,428 \text{ kW}$$

Teplo spalín na výstupe:

$$Q_{out} = Q_{in} - Q_C [\text{kW}] \quad (10.1 - 60)$$

$$Q_{out} = 9010,428 - 984,391$$

$$Q_{out} = 8026,037 \text{ kW}$$

Entalpia spalín za prvou časťou III. ťahu kotla:

$$I_{1. III.}^s = \frac{Q_{out}}{M_{pv}} [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (10.1 - 61)$$

$$I_{1. III.}^s = \frac{8026,037}{1,876}$$

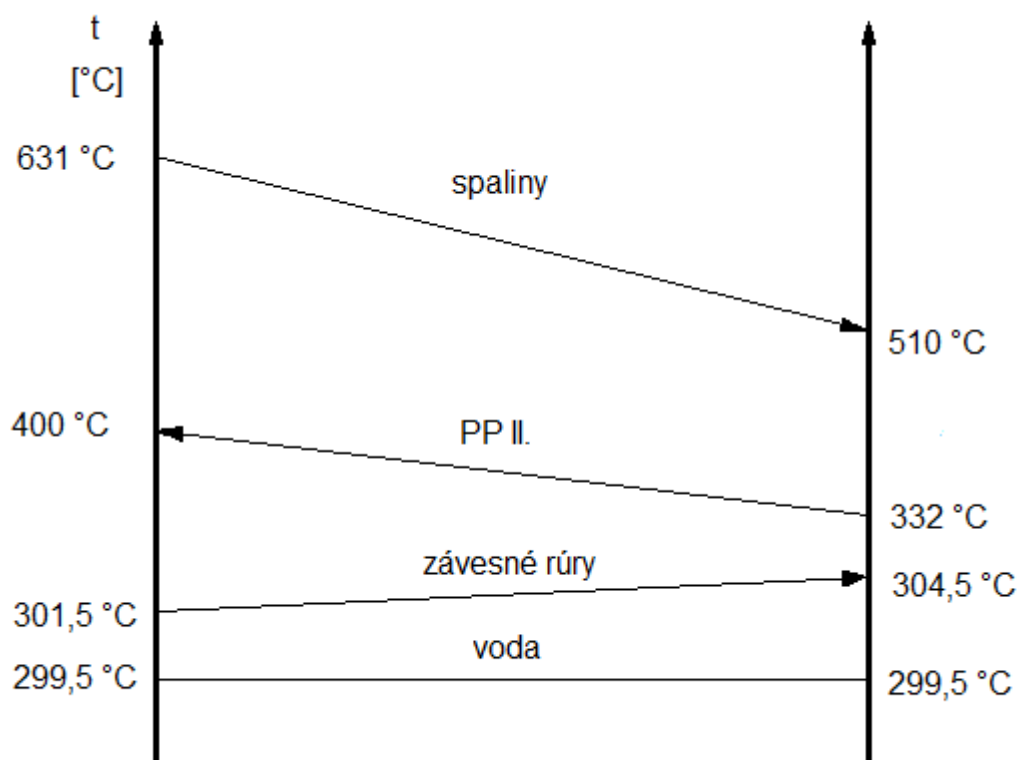
$$I_{1. III.}^s = 4278,271 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Podľa I – t diagramu je teplota spalín za 1. časťou III. ťahu 631 °C čo sa od zvolenej teploty líši o 1 °C teda o 0,15 %.

10.2 Druhá časť III. ťahu

Druhá časť III. ťahu je zložená z prehrievača pary 2, závesných rúr a membránovej steny.

Obr. 10.3 Diagram teplôt 2. časti III. ťahu



Teplota spalín na vstupe	$t_1 = 631 \text{ °C}$
Teplota spalín na výstupe	$t_2 = 510 \text{ °C}$
Entalpia spalín na vstupe	$i_{1. III.}^s = 4278 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Entalpia spalín na výstupe	$i_{2. III.}^s = 3399 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Teplota pary na vstupe	$t_{PP2}^{in} = 332 \text{ °C}$
Teplota pary na výstupe	$t_{PP2}^{out} = 400 \text{ °C}$
Entalpia pary na vstupe	$i_{PP2}^{in} = 2905,26 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Entalpia pary na výstupe	$i_{PP2}^{out} = 3134,41 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Špecifický objem pary na vstupe	$v_{in} = 0,0266 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Špecifický objem pary na výstupe	$v_{out} = 0,0339 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

Stredná teplota spalín:

$$t_{\text{str}} = \frac{t_1 + t_2}{2} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (10.2 - 1)$$

$$t_{\text{str}} = \frac{631 + 510}{2}$$

$$t_{\text{str}} = 570,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

Stredný objem pary:

$$v_p = \frac{v_{\text{in}} + v_{\text{out}}}{2} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (10.2 - 2)$$

$$v_p = \frac{0,0226 + 0,0339}{2}$$

$$v_p = 0,0282 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Stredná teplota pary v PP2:

$$t_{\text{Pstr}} = \frac{t_{\text{PP3}}^{\text{in}} + t_{\text{PP3}}^{\text{out}}}{2} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (10.2 - 3)$$

$$t_{\text{Pstr}} = \frac{332 + 400}{2}$$

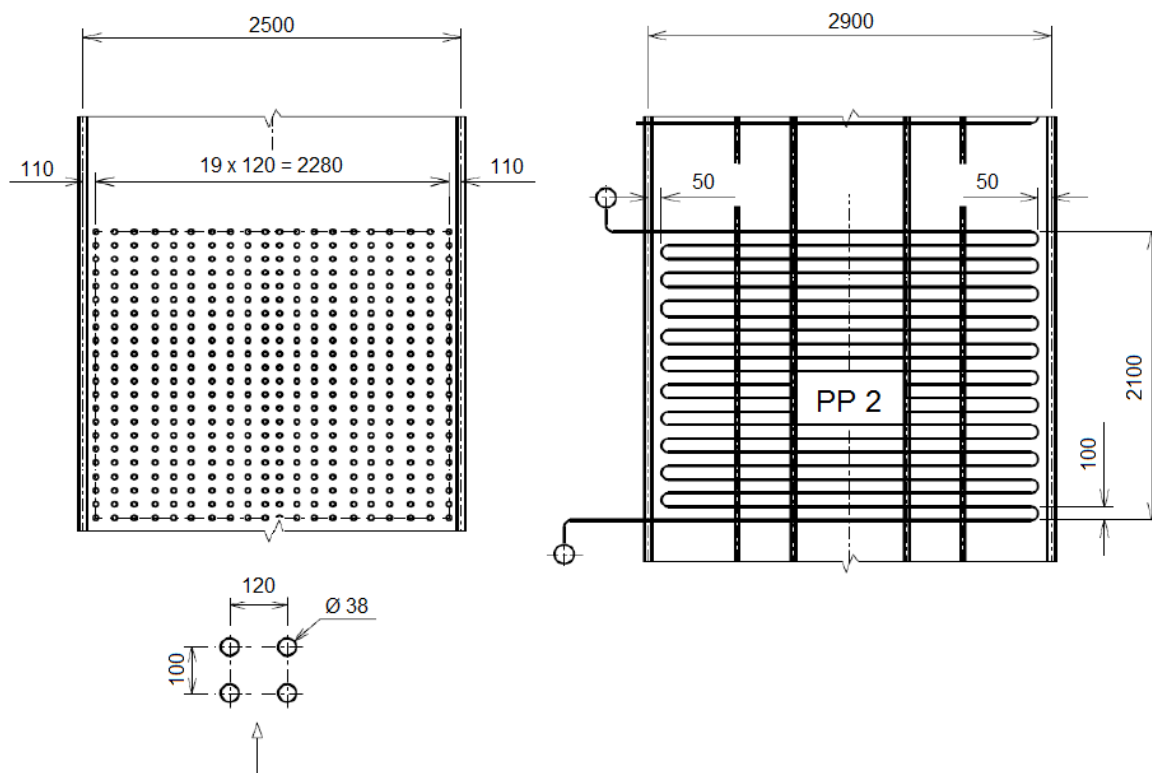
$$t_{\text{Pstr}} = 366 \text{ }^\circ\text{C}$$

10.2.1 Hlavná výhrevná plocha PP2

Prehrievač pary PP2 je konštruovaný z rúr 38 x 3,6 ako jednohad. Závesné rúry sú konštruované z rúr 38 x 5 a slúžia ako chladený záves prehrievača pary PP2. Usporiadanie rúr prehrievača pary PP2 je za sebou z dôvodu zábranenia väčšieho zanášania rúr.

Vonkajší priemer rúr	$D = 0,038 \text{ m}$
Vnútorý priemer rúr	$d = 0,0308 \text{ m}$
Priečny rozostúp	$s_1 = 0,12 \text{ m}$
Pozdĺžny rozostúp	$s_2 = 0,1 \text{ m}$
Počet rúr v rade	$z_1 = 20$
Počet radov	$z_2 = 22$
Počet hadov	$n = 1$
Výška	$h = 2,1$
Počet závesných rúr	$i = 20$
Rozmer závesných rúr	38 x 5

Obr. 10.4 Konštrukčná charakteristika prehrievača pary č.2



Priečna plocha zväzku a závesných rúr:

$$S_{tr} = D \cdot l_e \cdot z_1 + i \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad [m^2] \quad (10.2 - 4)$$

$$S_{tr} = 0,038 \cdot 2,8 \cdot 20 + 20 \cdot \frac{\pi \cdot 0,038^2}{4}$$

$$S_{tr} = 2,150 \, m^2$$

Svetlý prierez spalín:

$$S_{sp} = a \cdot b - S_{tr} \quad [m^2] \quad (10.2 - 5)$$

$$S_{sp} = 2,5 \cdot 2,9 - 2,150$$

$$S_{sp} = 5,1 \, m^2$$

Rýchlosť pary v rúrach prehrievača pary PP2:

$$w_p = \frac{4 \cdot \left(M_{pp} - \frac{M_v}{2} \right) \cdot v_p}{z_1 \cdot \pi \cdot d^2} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (10.2 - 6)$$

$$w_p = \frac{4 \cdot \left(6,11 - \frac{0,3}{2} \right) \cdot 0,0282}{20 \cdot \pi \cdot 0,0308^2}$$

$$w_p = 11,279 \, m \cdot s^{-1}$$

Rýchlosť spalín:

$$w_s = \frac{V_s}{S_{sp}} \cdot \frac{273,15 + t_{str}}{273,15} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (10.2 - 7)$$

$$w_s = \frac{8,241}{5,1} \cdot \frac{273,15 + 570,5}{273,15}$$

$$w_s = 4,990 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou na strane pary:

Hodnoty pre teplotu pary 366 °C:

$$\text{Merná tepelná vodivosť} \quad \lambda_p = 0,063 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\text{Dynamická viskozita} \quad \eta_p = 2,392 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{Prandtlovo číslo} \quad Pr_p = 1,2348$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda_s}{d} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d}{\eta_p \cdot v_p} \right)^{0,8} \cdot Pr_p^{0,4} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (10.2 - 8)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,063}{0,0308} \cdot \left(\frac{11,279 \cdot 0,0308}{2,539 \cdot 10^{-5} \cdot 0,0282} \right)^{0,8} \cdot 1,234^{0,4}$$

$$\alpha_k = 1810,386 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou na strane spalín:

Hodnoty pre strednú teplotu 570,5 °C:

$$\text{Súčiniteľ tepelnej vodivosti spalín} \quad \lambda_s = 7,2 \cdot 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\text{Kinematická viskozita} \quad v_s = 89,195 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{Prandtlovo číslo} \quad Pr = 0,622$$

Nakoľko je počet radov rúr prehrievača pary PP2 z_2 väčší ako 10 je korekcia na počet radov rúr $C_z = 1$. Taktiež korekcia na geometrickú konfiguráciu zväzku $C_s = 1$ keďže $\sigma_{pz} = \frac{s_2}{d}$ je väčšie ako 2.

$$\alpha_k = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left(\frac{w_s \cdot D}{v_s} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (10.2 - 9)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{7,2 \cdot 10^{-2}}{0,038} \cdot \left(\frac{4,990 \cdot 0,038}{89,195 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,65} \cdot 0,622^{0,33}$$

$$\alpha_k = 47,144 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Súčiniteľ oslabenia sálania popolčekomými časticami:

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_{str} + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}} \text{ [m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}] \quad (10.2 - 10)$$

$$k_p = \frac{5,7 \cdot 10^4}{\sqrt[3]{(570,5 + 273,15)^2 \cdot 20^2}}$$

$$k_p = 86,645 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Efektívna hrúbka sálavej vrstvy:

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) [\text{m}] \quad (10.2 - 11)$$

$$s = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,12 \cdot 0,1}{0,038^2} - 1 \right)$$

$$s = 0,327 \text{ m}$$

Výrobná teplovýmenná plocha:

$$S = \pi \cdot D \cdot l_e \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot n [\text{m}^2] \quad (10.2 - 12)$$

$$S = \pi \cdot 0,038 \cdot 2,8 \cdot 20 \cdot 22 \cdot 1$$

$$S = 147,076 \text{ m}^2$$

Teplota zaneseného povrchu rúr na strane spalín:

Súčiniteľ zanesenia volím $\varepsilon = 0,0064 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$.

$$t_{za} = t_{pstr} + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_k} \right) \cdot \frac{Q_{pp3}}{S} \cdot 10^3 [^\circ\text{C}] \quad (10.2 - 13)$$

$$t_{za} = 366 + \left(0,0064 + \frac{1}{1810,386} \right) \cdot \frac{1382,24}{147,076} \cdot 10^3$$

$$t_{za} = 431,339 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Súčiniteľ oslabenia sálania trojatómovými plynmi a vodnými parami:

$$k_s \cdot \omega_c = \left(\frac{2,49 + 5,11 \cdot \omega_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{p_c \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_{str} + 273,15}{1000} \right) \cdot \omega_c [\text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}] \quad (10.2 - 14)$$

$$k_s = \left(\frac{2,49 + 5,11 \cdot 0,219}{\sqrt{0,0341 \cdot 0,327}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{570,5 + 273,15}{1000} \right)$$

$$k_s = 22,807 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Optická hustota spalín:

$$k \cdot p \cdot s = (k_s \cdot \omega_c + k_p \cdot \mu_{pk}) \cdot p \cdot s \quad (10.2 - 15)$$

$$k \cdot p \cdot s = (22,807 \cdot 0,341 + 86,645 \cdot 0,0003819) \cdot 0,1 \cdot 0,327$$

$$k \cdot p \cdot s = 0,255$$

Stupeň čiernosti prúdu spalín:

$$a = 1 - e^{-kps} \quad (10.2 - 16)$$

$$a = 1 - e^{-0,255}$$

$$a = 0,225$$

Súčiniteľ prestupu tepla sálaním:

Stupeň čiernosti zanesených stien sálavých plôch volím $a_{za} = 0,8$.

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{za} + 1}{2} \cdot a \cdot (t_{str} + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{t_{za} + 273,15}{t_{str} + 273,15}\right)^4}{1 - \frac{t_{za} + 273,15}{t_{str} + 273,15}} [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (10.2 - 17)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,225 \cdot (570,5 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{431,339 + 273,15}{570,5 + 273,15}\right)^4}{1 - \frac{431,339 + 273,15}{570,5 + 273,15}}$$

$$\alpha_{sal} = 21,587 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$$

Celkový súčiniteľ prestupu tepla:

Súčiniteľ omývania volím $\omega = 1$.

$$\alpha_s = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_{sal}) [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (10.2 - 18)$$

$$\alpha_s = 1 \cdot (47,144 + 21,587)$$

$$\alpha_s = 68,731 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$$

Súčiniteľ prestupu tepla:

$$k = \frac{\alpha_s}{1 + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_k}\right) \cdot \alpha_s} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (10.2 - 19)$$

$$k = \frac{68,731}{1 + \left(0,0064 + \frac{1}{1810,386}\right) \cdot 68,731}$$

$$k = 46,507 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

Logaritmickej rozdiel teplôt:

$$\Delta t_1 = t_1 - t_{PP2}^{in} [^{\circ}C] \quad (10.2 - 20)$$

$$\Delta t_1 = 631 - 400$$

$$\Delta t_1 = 231 ^{\circ}C$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_{PP2}^{out} [^{\circ}C] \quad (10.2 - 21)$$

$$\Delta t_2 = 510 - 332$$

$$\Delta t_2 = 178 ^{\circ}C$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} [^{\circ}C] \quad (10.2 - 22)$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{231 - 178}{\ln \frac{231}{178}}$$

$$\Delta t_{ln} = 203,350 ^{\circ}C$$

Veľkosť výhrevnej plochy:

$$S_{PP2} = \frac{Q_{PP2}}{k \cdot \Delta t_{ln}} \cdot 10^3 \text{ [m}^2\text{]} \quad (10.2 - 23)$$

$$S_{PP2} = \frac{1382,24}{46,507 \cdot 203,350} \cdot 10^3$$

$$S_{PP2} = 146,157 \text{ m}^2$$

Veľkosť výhrevných plôch sa od seba líši o 0,62 %.

10.2.2 Výpočet membránovej steny

Obvod spalínovodu:

$$O = 2 \cdot (a + b) + i \cdot \pi \cdot D + 2 \cdot z_1 \cdot (l_e + D) \text{ [m]} \quad (10.2 - 24)$$

$$O = 2 \cdot (2,5 + 2,9) + 20 \cdot \pi \cdot 0,038 + 2 \cdot 20 \cdot (2,8 + 0,038)$$

$$O = 126,707 \text{ m}$$

Ekvivalentný priemer spalínovodu:

$$d_{ek} = \frac{4 \cdot S_{sp}}{O} \text{ [m]} \quad (10.2 - 25)$$

$$d_{ek} = \frac{4 \cdot 5,1}{126,707}$$

$$d_{ek} = 0,161 \text{ m}$$

Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou:

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda_s}{d_{ek}} \cdot \left(\frac{w_s \cdot d_{ek}}{v_s} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{]} \quad (10.2 - 26)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{7,2 \cdot 10^{-2}}{0,161} \cdot \left(\frac{4,990 \cdot 0,161}{89,195 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,622^{0,4}$$

$$\alpha_k = 12,399 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Súčiniteľ oslabenia sálania popolčekomými časticami:

Súčiniteľ oslabenia sálania popolčekomými časticami membránovej steny v 2. časti III. ťahu je rovnaký ako súčiniteľ oslabenia sálania popolčekomými časticami súbežnej teplovýmennej plochy PP2, teda $k_p = 86,645 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$.

Objem sálavej vrstvy 2. časti III. ťahu:

$$V = a \cdot b \cdot h \text{ [m}^3\text{]} \quad (10.2 - 27)$$

$$V = 2,5 \cdot 2,9 \cdot 2,1$$

$$V = 15,225 \text{ m}^3$$

Projekčný povrch stien 2. časti III. ťahu:

$$S_{proj} = 2 \cdot (a \cdot h + b \cdot h) \text{ [m}^2\text{]} \quad (10.2 - 28)$$

$$S_{proj} = 2 \cdot (2,5 \cdot 2,1 + 2,9 \cdot 2,1)$$

$$S_{proj} = 22,68 \text{ m}^2$$

Efektívna sálavá hrúbka:

$$s = 3,6 \frac{V}{S_{\text{proj}}} \text{ [m]} \quad (10.2 - 29)$$

$$s = 3,6 \frac{15,225}{22,68}$$

$$s = 2,416 \text{ m}$$

Súčiniteľ oslabenia sálania trojatómovými plynmi a vodnými parami:

$$k_s \cdot \omega_c = \left(\frac{2,49 + 5,11 \cdot \omega_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{p_c \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_{\text{str}} + 273,15}{1000} \right) \cdot \omega_c \text{ [m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}] \quad (10.2 - 30)$$

$$k_s = \left(\frac{2,49 + 5,11 \cdot 0,219}{\sqrt{0,0341 \cdot 2,416}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{570,5 + 273,15}{1000} \right)$$

$$k_s = 7,947 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Optická hustota spalín:

$$k \cdot p \cdot s = (k_s \cdot \omega_c + k_p \cdot \mu_{pk}) \cdot p \cdot s \quad (10.2 - 31)$$

$$k \cdot p \cdot s = (7,947 \cdot 0,341 + 86,645 \cdot 0,0003819) \cdot 0,1 \cdot 2,416$$

$$k \cdot p \cdot s = 0,662$$

Stupeň čiernosti prúdu spalín:

$$a = 1 - e^{-kps} \quad (10.2 - 32)$$

$$a = 1 - e^{-0,662}$$

$$a = 0,484$$

Predbežné teplo odovzdané spalinami výparníku v 2. časti III. ťahu:

$$Q_1 = (I_{1. \text{ III.}}^s - I_{2. \text{ III.}}^s) \cdot M_{pv} - Q_{PP2} - Q_{zr} \text{ [kW]} \quad (10.2 - 33)$$

$$Q_1 = (4278 - 3399) \cdot 1,876 - 1382,24 - 90$$

$$Q_1 = 176,764 \text{ kW}$$

Predbežné tepelné zaťaženie 2. časti III. ťahu:

$$q_{pr} = \frac{Q_1}{S_{\text{proj}}} \cdot 10^3 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (10.2 - 34)$$

$$q_{pr} = \frac{176,764}{22,68} \cdot 10^3$$

$$q_{pr} = 7793,827 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Teplota zaneseného povrchu rúr:

$$\text{Súčiniteľ zanesenia volím } \varepsilon = 0,0045 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}.$$

$$t_{za} = t_{\text{syt}} + \varepsilon \cdot q_{pr} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (10.2 - 35)$$

$$t_{za} = 299,5 + 0,0045 \cdot 7793,827$$

$$t_{za} = 334,572 \text{ }^\circ\text{C}$$

Súčiniteľ prestupu tepla sálaním:

Stupeň čiernosti zanesených stien sálavých plôch volím $a_{za} = 0,8$.

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{za} + 1}{2} \cdot a \cdot (t_{str} + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{t_{za} + 273,15}{t_{str} + 273,15}\right)^4}{1 - \frac{t_{za} + 273,15}{t_{str} + 273,15}} \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (10.2 - 36)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,484 \cdot (570,5 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{334,572 + 273,15}{570,5 + 273,15}\right)^4}{1 - \frac{334,572 + 273,15}{570,5 + 273,15}}$$

$$\alpha_{sal} = 38,957 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Celkový súčiniteľ prestupu tepla:

Súčiniteľ omývania volím $\omega = 1$.

$$\alpha_s = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_{sal}) \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (10.2 - 37)$$

$$\alpha_s = 1 \cdot (12,399 + 38,957)$$

$$\alpha_s = 51,356 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Súčiniteľ prestupu tepla:

$$k = \frac{\alpha_s}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_s} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (10.2 - 38)$$

$$k = \frac{51,356}{1 + 0,0045 \cdot 51,356}$$

$$k = 41,715 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Logaritmický rozdiel teplôt:

$$\Delta t_1 = t_1 - t_{syf} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (10.2 - 39)$$

$$\Delta t_1 = 631 - 299,5$$

$$\Delta t_1 = 331,5 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_{syf} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (10.2 - 40)$$

$$\Delta t_2 = 510 - 299,5$$

$$\Delta t_2 = 210,5 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (10.2 - 41)$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{331,5 - 210,5}{\ln \frac{331,5}{210,5}}$$

$$\Delta t_{ln} = 266,436 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

Teplo odobrané výparníkom v 2. časti III. ťahu:

$$Q_{vyp} = k \cdot S \cdot \Delta t_{ln} \cdot 10^{-3} \quad [\text{kW}] \quad (10.2 - 42)$$

$$Q_{vyp} = 41,715 \cdot 22,68 \cdot 266,436 \cdot 10^{-3}$$

$$Q_{vyp} = 252,074 \text{ kW}$$

10.2.3 Výpočet závesných rúr

Teplota pary na vstupe	$t_{zr}^{in} = 301,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Teplota pary na výstupe	$t_{zr}^{out} = 304,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Tlak pary na vstupe	$p_{zr}^{in} = 8,53 \text{ MPa}$
Tlak pary na výstupe	$p_{zr}^{out} = 8,51 \text{ MPa}$
Entalpia pary na vstupe	$i_{zr}^{in} = 2764,826 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Entalpia pary na výstupe	$i_{zr}^{out} = 2778,82 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Špecifický objem pary na vstupe	$v_{in} = 0,0220 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Špecifický objem pary na výstupe	$v_{out} = 0,0225 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

Stredný objem pary:

$$v_p = \frac{v_{in} + v_{out}}{2} [^{\circ}\text{C}] \quad (10.2 - 43)$$

$$v_p = \frac{0,022 + 0,0225}{2}$$

$$v_p = 0,02225 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Stredná teplota pary v závesných rúrach:

$$t_{pstr} = \frac{t_{zr}^{in} + t_{zr}^{out}}{2} [^{\circ}\text{C}] \quad (10.2 - 44)$$

$$t_{pstr} = \frac{301,5 + 304,5}{2}$$

$$t_{pstr} = 303 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Rýchlosť pary v závesných rúrach:

$$w_p = \frac{4 \cdot (M_{pp} - M_v) \cdot v_p}{i \cdot \pi \cdot d^2} [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (10.2 - 45)$$

$$w_p = \frac{4 \cdot (6,11 - 0,3) \cdot 0,02225}{20 \cdot \pi \cdot 0,028^2}$$

$$w_p = 10,497 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou na strane pary:

Hodnoty pre teplotu pary 303 °C:

$$\text{Merná tepelná vodivosť} \quad \lambda_p = 0,0699 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\text{Dynamická viskozita} \quad \eta_p = 2,01 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{Prandtlovo číslo} \quad Pr_p = 1,3883$$

$$\alpha_k = \alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d}{\eta_p \cdot v_p} \right)^{0,8} \cdot Pr_p^{0,4} [\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (10.2 - 46)$$

$$\alpha_k = \alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,0699}{0,028} \cdot \left(\frac{10,497 \cdot 0,028}{2,01 \cdot 10^{-5} \cdot 0,02225} \right)^{0,8} \cdot 1,3883^{0,4}$$

$$\alpha_k = \alpha_2 = 2952,555 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou na strane spalín:

Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou závesných rúr na strane spalín je rovnaký ako súčiniteľ prestupu tepla na strane spalín teplovýmennej plochy PP2 ktorá je na závesných rúrach zavesená, teda $\alpha_k = 47,144 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Súčiniteľ oslabenia sálania popolčekomými časticami:

Súčiniteľ oslabenia sálania popolčekomými časticami závesných rúr je rovnaký ako súčiniteľ oslabenia sálania popolčekomými časticami teplovýmennej plochy PP2 ktorá je na závesných rúrach zavesená, teda $k_p = 86,645 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$.

Efektívna sálavá hrúbka:

Efektívna sálavá hrúbka závesných rúr je rovnaká ako efektívna sálavá hrúbka teplovýmennej plochy PP2 ktorá je na závesných rúrach zavesená teda $s = 0,327 \text{ m}$

Súčiniteľ oslabenia sálania trojatómovými plynmi a vodnými parami:

Súčiniteľ oslabenia sálania trojatómovými plynmi a vodnými parami závesných rúr je rovnaký ako súčiniteľ oslabenia sálania trojatómovými plynmi a vodnými parami teplovýmennej plochy PP2 ktorá je na závesných rúrach zavesená, teda $k_s = 22,807 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$.

Optická hustota spalín:

Optická hustota spalín závesných rúr je rovnaká ako optická hustota spalín teplovýmennej plochy PP2 ktorá je na závesných rúrach zavesená teda, $k \cdot p \cdot s = 0,255$.

Stupeň čiernosti prúdu spalín:

Stupeň čiernosti prúdu spalín závesných rúr je rovnaký ako stupeň čiernosti prúdu spalín teplovýmennej plochy PP2 ktorá je na závesných rúrach zavesená teda, $a = 0,225$.

Výrobná teplovýmenná plocha:

$$S = \pi \cdot D \cdot h \cdot i \text{ [m}^2\text{]} \quad (10.2 - 47)$$

$$S = \pi \cdot 0,038 \cdot 2,1 \cdot 20$$

$$S = 5,013 \text{ m}^2$$

Predbežne teplo odobrané závesnými rúrami spalinám:

$$Q_1 = (M_{pp} - M_v) \cdot (i_{zr}^{out} - i_{zr}^{in}) \text{ [kW]} \quad (10.2 - 48)$$

$$Q_1 = (6,11 - 0,3) \cdot (2778,82 - 2764,826)$$

$$Q_1 = 81,305 \text{ kW}$$

Teplota zaneseného povrchu rúr na strane spalín:

Súčiniteľ zanesenia volím $\varepsilon = 0,002 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$.

$$t_{za} = t_{Pstr} + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{Q_1}{S} \cdot 10^3 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (10.2 - 49)$$

$$t_{za} = 303 + \left(0,002 + \frac{1}{2952,555} \right) \cdot \frac{81,305}{5,013} \cdot 10^3$$

$$t_{za} = 340,930 \text{ }^\circ\text{C}$$

Súčiniteľ prestupu tepla sálaním:

Stupeň čiernosti zanesených stien sálavých plôch volím $a_{za} = 0,8$.

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{za} + 1}{2} \cdot a \cdot (t_{str} + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{t_{za} + 273,15}{t_{str} + 273,15} \right)^4}{1 - \frac{t_{za} + 273,15}{t_{str} + 273,15}} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (10.2 - 50)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,225 \cdot (570,5 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{340,930 + 273,15}{570,5 + 273,15} \right)^4}{1 - \frac{340,930 + 273,15}{570,5 + 273,15}}$$

$$\alpha_{sal} = 18,320 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Celkový súčiniteľ prestupu tepla:

Súčiniteľ omývania volím $\omega = 1$.

$$\alpha_s = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_{sal}) \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (10.2 - 51)$$

$$\alpha_s = 1 \cdot (47,144 + 18,320)$$

$$\alpha_s = 65,464 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Súčiniteľ prestupu tepla:

$$k = \frac{\alpha_s}{1 + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_k} \right) \cdot \alpha_s} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (10.2 - 52)$$

$$k = \frac{65,464}{1 + \left(0,002 + \frac{1}{2952,555} \right) \cdot 65,853}$$

$$k = 56,727 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Logaritmický rozdiel teplôt:

$$\Delta t_1 = t_1 - t_{zr}^{in} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (10.2 - 53)$$

$$\Delta t_1 = 631 - 301,5$$

$$\Delta t_1 = 329,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_{zr}^{out} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (10.2 - 54)$$

$$\Delta t_2 = 510 - 304,5$$

$$\Delta t_2 = 205,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{\ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} [^{\circ}\text{C}] \quad (10.2 - 55)$$

$$\Delta t_{\ln} = \frac{329,5 - 205,5}{\ln \frac{329,5}{205,5}}$$

$$\Delta t_{\ln} = 262,639 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

Teplu odobrané závesnými rúrami:

$$Q_{zr} = k \cdot S \cdot \Delta t_{\ln} \cdot 10^{-3} [\text{kW}] \quad (10.2 - 56)$$

$$Q_{zr} = 56,727 \cdot 5,013 \cdot 262,639 \cdot 10^{-3}$$

$$Q_{zr} = 74,687 \text{ kW}$$

Prepočet entalpie výstupnej pary zo závesných rúr:

$$i_{zr}^{\text{out}} = \frac{Q_{zr} + (M_{pp} - M_v) \cdot i_{zr}^{\text{in}}}{M_{pp} - M_v} [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (10.2 - 57)$$

$$i_{zr}^{\text{out}} = \frac{74,687 + (6,11 - 0,3) \cdot 2764,826}{6,11 - 0,3}$$

$$i_{zr}^{\text{out}} = 2777,680 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Tejto hodnote entalpie a tlaku zodpovedá teplota 304,5 °C ktorá sa zhoduje so zvolenou teplotou pary na výstupe zo závesných rúr.

Prepočet teploty spalín na výstupe z 2. časti III. ťahu:

Celkové teplo:

$$Q_C = Q_{PP3} + Q_{vyp} + Q_{zr} [\text{kW}] \quad (10.2 - 58)$$

$$Q_C = 1382,24 + 252,074 + 74,687$$

$$Q_C = 1709,001 \text{ kW}$$

Teplu spalín na vstupe:

$$Q_{\text{in}} = I_{1. \text{ III. }}^s \cdot M_{pv} [\text{kW}] \quad (10.2 - 59)$$

$$Q_{\text{in}} = 4278,271 \cdot 1,876$$

$$Q_{\text{in}} = 8026,036 \text{ kW}$$

Teplu spalín na výstupe:

$$Q_{\text{out}} = Q_{\text{in}} - Q_C [\text{kW}] \quad (10.2 - 60)$$

$$Q_{\text{out}} = 8026,036 - 1709,001$$

$$Q_{\text{out}} = 6317,035 \text{ kW}$$

Entalpia spalín za druhou časťou III. ťahu kotla:

$$I_{2. \text{ III. }}^s = \frac{Q_{\text{out}}}{M_{pv}} [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (10.2 - 61)$$

$$I_{2. \text{ III. }}^s = \frac{6317,035}{1,876}$$

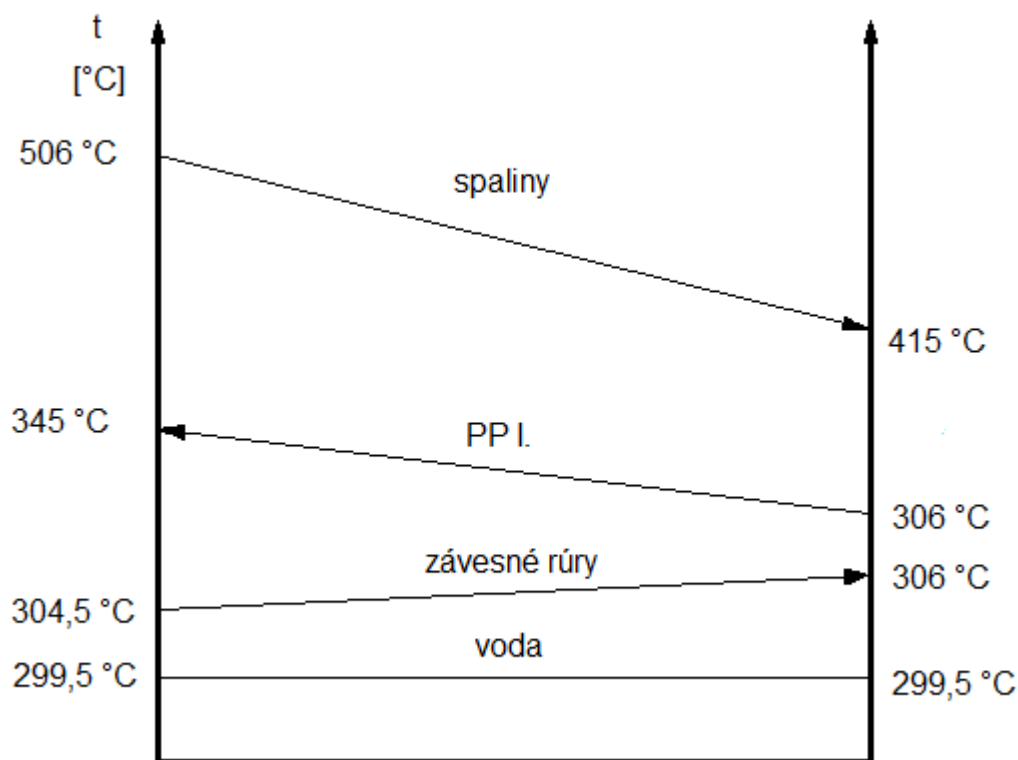
$$I_{2. \text{ III. }}^s = 3367,289 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Podľa I – t diagramu je teplota spalín za 2. časťou III. ťahu 506 °C čo sa od zvolenej teploty líši o 4 °C teda o 0,78 %.

10.3 Tretia časť III. ťahu

Tretia časť III. ťahu je zložená z prehrievača pary 1, závesných rúr a membránovej steny.

Obr. 10.5 Diagram teplôt 3. časti III. ťahu



Teplota spalín na vstupe	$t_1 = 506 \text{ °C}$
Teplota spalín na výstupe	$t_2 = 415 \text{ °C}$
Entalpia spalín na vstupe	$i_{2. \text{ III. }}^s = 3367,289 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Entalpia spalín na výstupe	$i_{3. \text{ III. }}^s = 2729,45 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Teplota pary na vstupe	$t_{PP1}^{\text{in}} = 306 \text{ °C}$
Teplota pary na výstupe	$t_{PP1}^{\text{out}} = 345 \text{ °C}$
Entalpia pary na vstupe	$i_{PP1}^{\text{in}} = 2785 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Entalpia pary na výstupe	$i_{PP1}^{\text{out}} = 2953,43 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Špecifický objem pary na vstupe	$v_{\text{in}} = 0,0232 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Špecifický objem pary na výstupe	$v_{\text{out}} = 0,028 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

Stredná teplota spalín:

$$t_{\text{str}} = \frac{t_1 + t_2}{2} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (10.3 - 1)$$

$$t_{\text{str}} = \frac{506 + 415}{2}$$

$$t_{\text{str}} = 460,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

Stredný objem pary:

$$v_p = \frac{v_{\text{in}} + v_{\text{out}}}{2} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (10.3 - 2)$$

$$v_p = \frac{0,0232 + 0,028}{2}$$

$$v_p = 0,0256 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Stredná teplota pary v PP1:

$$t_{\text{Pstr}} = \frac{t_{\text{PP3}}^{\text{in}} + t_{\text{PP3}}^{\text{out}}}{2} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (10.3 - 3)$$

$$t_{\text{Pstr}} = \frac{306 + 345}{2}$$

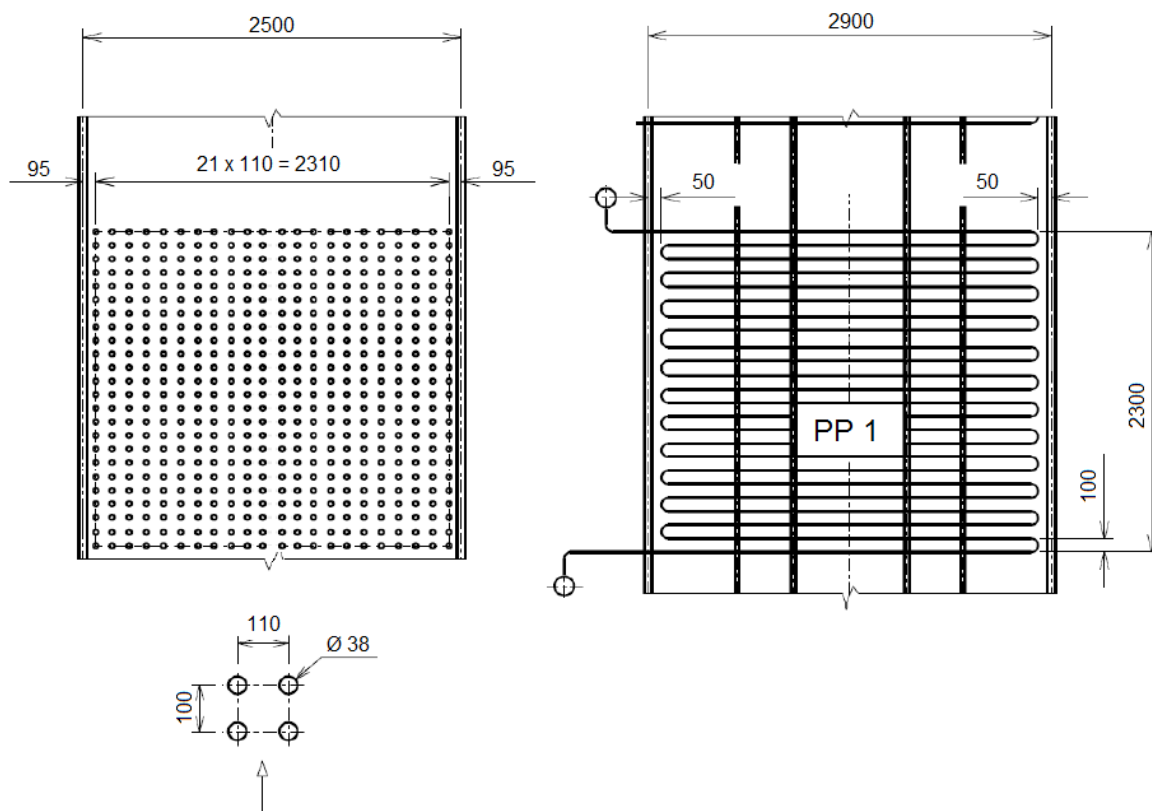
$$t_{\text{Pstr}} = 325,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

10.3.1 Hlavná výhrevná plocha PP1

Prehrievač pary PP1 je konštruovaný z rúr 38 x 3,6 ako jednohad. Závesné rúry sú konštruované z rúr 38 x 5 a slúžia ako chladený záves prehrievača pary PP1. Usporiadanie rúr prehrievača pary PP1 je za sebou z dôvodu zábranenia väčšieho zanášania rúr.

Vonkajší priemer rúr	$D = 0,038 \text{ m}$
Vnútorý priemer rúr	$d = 0,0308 \text{ m}$
Priečny rozostúp	$s_1 = 0,11 \text{ m}$
Pozdĺžny rozostúp	$s_2 = 0,1 \text{ m}$
Počet rúr v rade	$z_1 = 22$
Počet radov	$z_2 = 24$
Počet hadov	$n = 1$
Výška	$h = 2,3$
Počet závesných rúr	$i = 20$
Rozmer závesných rúr	38×5

Obr. 10.6 Konštrukčná charakteristika prehrievača pary č.1



Priečna plocha zväzku a závesných rúr:

$$S_{tr} = D \cdot l_e \cdot z_1 + i \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad [m^2] \quad (10.3 - 4)$$

$$S_{tr} = 0,038 \cdot 2,8 \cdot 22 + 20 \cdot \frac{\pi \cdot 0,038^2}{4}$$

$$S_{tr} = 2,363 \, m^2$$

Svetlý prierez spalín:

$$S_{sp} = a \cdot b - S_{tr} \quad [m^2] \quad (10.3 - 5)$$

$$S_{sp} = 2,5 \cdot 2,9 - 2,363$$

$$S_{sp} = 4,887 \, m^2$$

Rýchlosť pary v rúrach prehrievača pary PP1:

$$w_p = \frac{4 \cdot (M_{pp} - M_v) \cdot v_p}{z_1 \cdot \pi \cdot d^2} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (10.3 - 6)$$

$$w_p = \frac{4 \cdot (6,11 - 0,3) \cdot 0,0256}{22 \cdot \pi \cdot 0,0308^2}$$

$$w_p = 9,074 \, m \cdot s^{-1}$$

Rýchlosť spalín:

$$w_s = \frac{V_s}{S_{sp}} \cdot \frac{273,15 + t_{str}}{273,15} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (10.3 - 7)$$

$$w_s = \frac{8,242}{4,887} \cdot \frac{273,15 + 460,5}{273,15}$$

$$w_s = 4,529 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou na strane pary:

Hodnoty pre teplotu pary 325,5 °C:

$$\text{Merná tepelná vodivosť} \quad \lambda_p = 0,0644 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\text{Dynamická viskozita} \quad \eta_p = 2,165 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{Prandtlovo číslo} \quad \text{Pr}_p = 1,3397$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d}{\eta_p \cdot v_p} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}_p^{0,4} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (10.3 - 8)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,0644}{0,0308} \cdot \left(\frac{9,074 \cdot 0,0308}{2,165 \cdot 10^{-5} \cdot 0,0256} \right)^{0,8} \cdot 1,3397^{0,4}$$

$$\alpha_k = 1972,365 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou na strane spalín:

Hodnoty pre strednú teplotu 460,5 °C:

$$\text{Súčiniteľ tepelnej vodivosti spalín} \quad \lambda_s = 6,319 \cdot 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\text{Kinematická viskozita} \quad \nu_s = 71,842 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{Prandtlovo číslo} \quad \text{Pr} = 0,632$$

Nakoľko je počet radov rúr prehrievača pary PP1 z_2 väčší ako 10 je korekcia na počet radov rúr $C_z = 1$. Taktiež korekcia na geometrickú konfiguráciu zväzku $C_s = 1$ keďže $\sigma_{pz} = \frac{s_2}{d}$ je väčšie ako 2.

$$\alpha_k = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left(\frac{w_s \cdot D}{\nu_s} \right)^{0,65} \cdot \text{Pr}^{0,33} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (10.3 - 9)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{6,319 \cdot 10^{-2}}{0,038} \cdot \left(\frac{4,529 \cdot 0,038}{71,842 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,65} \cdot 0,632^{0,33}$$

$$\alpha_k = 44,951 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Súčiniteľ oslabenia sálania popolčekomými časticami:

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_{str} + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}} \text{ [m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}] \quad (10.3 - 10)$$

$$k_p = \frac{5,7 \cdot 10^4}{\sqrt[3]{(460,5 + 273,15)^2 \cdot 20^2}}$$

$$k_p = 95,103 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Efektívna hrúbka sálavej vrstvy:

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) [\text{m}] \quad (10.3 - 11)$$

$$s = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,11 \cdot 0,1}{0,038^2} - 1 \right)$$

$$s = 0,297 \text{ m}$$

Výrobná teplovýmenná plocha:

$$S = \pi \cdot D \cdot l_e \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot n [\text{m}^2] \quad (10.3 - 12)$$

$$S = \pi \cdot 0,038 \cdot 2,8 \cdot 22 \cdot 22 \cdot 1$$

$$S = 176,492 \text{ m}^2$$

Teplota zaneseného povrchu rúr na strane spalín:

Súčiniteľ zanesenia volím $\varepsilon = 0,0062 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$.

$$t_{za} = t_{pstr} + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_k} \right) \cdot \frac{Q_{pp3}}{S} \cdot 10^3 [^\circ\text{C}] \quad (10.3 - 13)$$

$$t_{za} = 325,5 + \left(0,0062 + \frac{1}{1972,365} \right) \cdot \frac{1015,007}{176,492} \cdot 10^3$$

$$t_{za} = 364,072 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Súčiniteľ oslabenia sálania trojatómovými plynmi a vodnými parami:

$$k_s \cdot \omega_c = \left(\frac{2,49 + 5,11 \cdot \omega_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{p_c \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_{str} + 273,15}{1000} \right) \cdot \omega_c [\text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}] \quad (10.3 - 14)$$

$$k_s = \left(\frac{2,49 + 5,11 \cdot 0,219}{\sqrt{0,0341 \cdot 0,297}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{460,5 + 273,15}{1000} \right)$$

$$k_s = 25,383 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Optická hustota spalín:

$$k \cdot p \cdot s = (k_s \cdot \omega_c + k_p \cdot \mu_{pk}) \cdot p \cdot s \quad (10.3 - 15)$$

$$k \cdot p \cdot s = (25,383 \cdot 0,341 + 95,103 \cdot 0,0003819) \cdot 0,1 \cdot 0,297$$

$$k \cdot p \cdot s = 0,258$$

Stupeň čiernosti prúdu spalín:

$$a = 1 - e^{-kps} \quad (10.3 - 16)$$

$$a = 1 - e^{-0,258}$$

$$a = 0,227$$

Súčiniteľ prestupu tepla sálaním:

Stupeň čiernosti zanesených stien sálavých plôch volím $a_{za} = 0,8$.

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{za} + 1}{2} \cdot a \cdot (t_{str} + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{t_{za} + 273,15}{t_{str} + 273,15}\right)^4}{1 - \frac{t_{za} + 273,15}{t_{str} + 273,15}} [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (10.3 - 17)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,227 \cdot (460,5 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{364,072 + 273,15}{460,5 + 273,15}\right)^4}{1 - \frac{364,072 + 273,15}{460,5 + 273,15}}$$

$$\alpha_{sal} = 15,074 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$$

Celkový súčiniteľ prestupu tepla:

Súčiniteľ omývania volím $\omega = 1$.

$$\alpha_s = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_{sal}) [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (10.3 - 18)$$

$$\alpha_s = 1 \cdot (44,951 + 15,074)$$

$$\alpha_s = 60,025 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$$

Súčiniteľ prestupu tepla:

$$k = \frac{\alpha_s}{1 + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_k}\right) \cdot \alpha_s} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (10.3 - 19)$$

$$k = \frac{60,025}{1 + \left(0,0062 + \frac{1}{1972,365}\right) \cdot 60,025}$$

$$k = 42,795 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

Logaritmickej rozdiel teplôt:

$$\Delta t_1 = t_1 - t_{PP2}^{in} [^{\circ}C] \quad (10.3 - 20)$$

$$\Delta t_1 = 506 - 345$$

$$\Delta t_1 = 161 ^{\circ}C$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_{PP2}^{out} [^{\circ}C] \quad (10.3 - 21)$$

$$\Delta t_2 = 415 - 306$$

$$\Delta t_2 = 109 ^{\circ}C$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} [^{\circ}C] \quad (10.3 - 22)$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{161 - 109}{\ln \frac{161}{109}}$$

$$\Delta t_{ln} = 133,314 ^{\circ}C$$

Veľkosť výhrevnej plochy:

$$S_{PP1} = \frac{Q_{PP1}}{k \cdot \Delta t_{ln}} \cdot 10^3 \text{ [m}^2\text{]} \quad (10.3 - 23)$$

$$S_{PP1} = \frac{1015,007}{42,795 \cdot 133,314} \cdot 10^3$$

$$S_{PP1} = 177,909 \text{ m}^2$$

Veľkosť výhrevných plôch sa od seba líši o 0,79 %.

10.3.2 Výpočet membránovej steny

Obvod spalínovodu:

$$O = 2 \cdot (a + b) + i \cdot \pi \cdot D + 2 \cdot z_1 \cdot (l_e + D) \text{ [m]} \quad (10.3 - 24)$$

$$O = 2 \cdot (2,5 + 2,9) + 20 \cdot \pi \cdot 0,038 + 2 \cdot 22 \cdot (2,8 + 0,038)$$

$$O = 141,759 \text{ m}$$

Ekvivalentný priemer spalínovodu:

$$d_{ek} = \frac{4 \cdot S_{sp}}{O} \text{ [m]} \quad (10.3 - 25)$$

$$d_{ek} = \frac{4 \cdot 4,887}{141,759}$$

$$d_{ek} = 0,137 \text{ m}$$

Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou:

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda_s}{d_{ek}} \cdot \left(\frac{w_s \cdot d_{ek}}{v_s} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{]} \quad (10.3 - 26)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{6,319 \cdot 10^{-2}}{0,137} \cdot \left(\frac{4,529 \cdot 0,137}{71,842 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,632^{0,4}$$

$$\alpha_k = 12,445 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Súčiniteľ oslabenia sálania popolčekomými časticami:

Súčiniteľ oslabenia sálania popolčekomými časticami membránovej steny v 3. časti III. ťahu je rovnaký ako súčiniteľ oslabenia sálania popolčekomými časticami súbežnej teplovýmennej plochy PP1, teda $k_p = 95,103 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$.

Objem sálavej vrstvy 3. časti III. ťahu:

$$V = a \cdot b \cdot h \text{ [m}^3\text{]} \quad (10.3 - 27)$$

$$V = 2,5 \cdot 2,9 \cdot 2,3$$

$$V = 16,675 \text{ m}^3$$

Projekčný povrch stien 3. časti III. ťahu:

$$S_{proj} = 2 \cdot (a \cdot h + b \cdot h) \text{ [m}^2\text{]} \quad (10.3 - 28)$$

$$S_{proj} = 2 \cdot (2,5 \cdot 2,3 + 2,9 \cdot 2,3)$$

$$S_{proj} = 24,84 \text{ m}^2$$

Efektívna sálavá hrúbka:

$$s = 3,6 \frac{V}{S_{\text{proj}}} \text{ [m]} \quad (10.3 - 29)$$

$$s = 3,6 \frac{16,675}{24,84}$$

$$s = 2,416 \text{ m}$$

Súčiniteľ oslabenia sálania trojatómovými plynmi a vodnými parami:

$$k_s \cdot \omega_c = \left(\frac{2,49 + 5,11 \cdot \omega_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{p_c \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_{\text{str}} + 273,15}{1000} \right) \cdot \omega_c \text{ [m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}] \quad (10.3 - 30)$$

$$k_s = \left(\frac{2,49 + 5,11 \cdot 0,219}{\sqrt{0,0341 \cdot 2,416}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{460,5 + 273,15}{1000} \right)$$

$$k_s = 8,418 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Optická hustota spalín:

$$k \cdot p \cdot s = (k_s \cdot \omega_c + k_p \cdot \mu_{pk}) \cdot p \cdot s \quad (10.3 - 31)$$

$$k \cdot p \cdot s = (8,418 \cdot 0,341 + 95,103 \cdot 0,0003819) \cdot 0,1 \cdot 2,416$$

$$k \cdot p \cdot s = 0,702$$

Stupeň čiernosti prúdu spalín:

$$a = 1 - e^{-kps} \quad (10.3 - 32)$$

$$a = 1 - e^{-0,702}$$

$$a = 0,504$$

Predbežné teplo odovzdané spalinami výparníku v 3. časti III. ťahu:

$$Q_1 = (I_{2. \text{ III.}}^s - I_{3. \text{ III.}}^s) \cdot M_{pv} - Q_{PP1} - Q_{zr} \text{ [kW]} \quad (10.3 - 33)$$

$$Q_1 = (3367,289 - 2729,45) \cdot 1,876 - 1015,007 - 45$$

$$Q_1 = 136,578 \text{ kW}$$

Predbežné tepelné zaťaženie 3. časti III. ťahu:

$$q_{pr} = \frac{Q_1}{S_{\text{proj}}} \cdot 10^3 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (10.3 - 34)$$

$$q_{pr} = \frac{136,578}{24,84} \cdot 10^3$$

$$q_{pr} = 5498,309 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Teplota zaneseného povrchu rúr:

$$\text{Súčiniteľ zanesenia volím } \varepsilon = 0,0045 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}.$$

$$t_{za} = t_{\text{sy}} + \varepsilon \cdot q_{pr} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (10.3 - 35)$$

$$t_{za} = 299,5 + 0,0045 \cdot 5498,309$$

$$t_{za} = 324,242 \text{ }^\circ\text{C}$$

Súčiniteľ prestupu tepla sálaním:

Stupeň čiernosti zanesených stien sálavých plôch volím $a_{za} = 0,8$.

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{za} + 1}{2} \cdot a \cdot (t_{str} + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{t_{za} + 273,15}{t_{str} + 273,15}\right)^4}{1 - \frac{t_{za} + 273,15}{t_{str} + 273,15}} [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (10.3 - 36)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,504 \cdot (460,5 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{324,242 + 273,15}{460,5 + 273,15}\right)^4}{1 - \frac{324,242 + 273,15}{460,5 + 273,15}}$$

$$\alpha_{sal} = 30,804 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$$

Celkový súčiniteľ prestupu tepla:

Súčiniteľ omývania volím $\omega = 1$.

$$\alpha_s = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_{sal}) [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (10.3 - 37)$$

$$\alpha_s = 1 \cdot (12,445 + 30,804)$$

$$\alpha_s = 43,249 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$$

Súčiniteľ prestupu tepla:

$$k = \frac{\alpha_s}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_s} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (10.3 - 38)$$

$$k = \frac{43,249}{1 + 0,0045 \cdot 43,249}$$

$$k = 36,203 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

Logaritmický rozdiel teplôt:

$$\Delta t_1 = t_1 - t_{syf} [^{\circ}C] \quad (10.3 - 39)$$

$$\Delta t_1 = 506 - 299,5$$

$$\Delta t_1 = 206,5 ^{\circ}C$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_{syf} [^{\circ}C] \quad (10.3 - 40)$$

$$\Delta t_2 = 415 - 299,5$$

$$\Delta t_2 = 115,5 ^{\circ}C$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} [^{\circ}C] \quad (10.3 - 41)$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{206,5 - 115,5}{\ln \frac{206,5}{115,5}}$$

$$\Delta t_{ln} = 156,618 ^{\circ}C$$

Teplo odobrané výparníkom v 3. časti III. ťahu:

$$Q_{vyp} = k \cdot S \cdot \Delta t_{ln} \cdot 10^{-3} [kW] \quad (10.3 - 42)$$

$$Q_{vyp} = 36,203 \cdot 24,84 \cdot 156,618 \cdot 10^{-3}$$

$$Q_{vyp} = 140,843 kW$$

10.3.3 Výpočet závesných rúr

Teplota pary na vstupe	$t_{zr}^{in} = 304,5 \text{ } ^\circ\text{C}$
Teplota pary na výstupe	$t_{zr}^{out} = 306 \text{ } ^\circ\text{C}$
Tlak pary na vstupe	$p_{zr}^{in} = 8,51 \text{ MPa}$
Tlak pary na výstupe	$p_{zr}^{out} = 8,5 \text{ MPa}$
Entalpia pary na vstupe	$i_{zr}^{in} = 2777,680 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Entalpia pary na výstupe	$i_{zr}^{out} = 2785 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Špecifický objem pary na vstupe	$v_{in} = 0,0225 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Špecifický objem pary na výstupe	$v_{out} = 0,0227 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

Stredný objem pary:

$$v_p = \frac{v_{in} + v_{out}}{2} \text{ [} ^\circ\text{C]} \quad (10.3 - 43)$$

$$v_p = \frac{0,0225 + 0,0227}{2}$$

$$v_p = 0,0226 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Stredná teplota pary v závesných rúrach:

$$t_{pstr} = \frac{t_{zr}^{in} + t_{zr}^{out}}{2} \text{ [} ^\circ\text{C]} \quad (10.3 - 44)$$

$$t_{pstr} = \frac{304,5 + 306}{2}$$

$$t_{pstr} = 305,25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Rýchlosť pary v závesných rúrach:

$$w_p = \frac{4 \cdot (M_{pp} - M_v) \cdot v_p}{i \cdot \pi \cdot d^2} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (10.3 - 45)$$

$$w_p = \frac{4 \cdot (6,11 - 0,3) \cdot 0,0226}{20 \cdot \pi \cdot 0,028^2}$$

$$w_p = 10,662 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou na strane pary:

Hodnoty pre teplotu pary 305,25 °C:

$$\text{Merná tepelná vodivosť} \quad \lambda_p = 0,068 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\text{Dynamická viskozita} \quad \eta_p = 2,033 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{Prandtlovo číslo} \quad Pr_p = 1,384$$

$$\alpha_k = \alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d}{\eta_p \cdot v_p} \right)^{0,8} \cdot Pr_p^{0,4} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (10.3 - 46)$$

$$\alpha_k = \alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,068}{0,028} \cdot \left(\frac{10,662 \cdot 0,028}{2,033 \cdot 10^{-5} \cdot 0,0226} \right)^{0,8} \cdot 1,384^{0,4}$$

$$\alpha_k = \alpha_2 = 2842,718 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou na strane spalín:

Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou závesných rúr na strane spalín je rovnaký ako súčiniteľ prestupu tepla na strane spalín teplovýmennej plochy PP1 ktorá je na závesných rúrach zavesená, teda $\alpha_k = 44,951 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Súčiniteľ oslabenia sálania popolčekomými časticami:

Súčiniteľ oslabenia sálania popolčekomými časticami závesných rúr je rovnaký ako súčiniteľ oslabenia sálania popolčekomými časticami teplovýmennej plochy PP1 ktorá je na závesných rúrach zavesená, teda $k_p = 95,103 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$.

Efektívna sálavá hrúbka:

Efektívna sálavá hrúbka závesných rúr je rovnaká ako efektívna sálavá hrúbka teplovýmennej plochy PP1 ktorá je na závesných rúrach zavesená, teda $s = 0,297 \text{ m}$.

Súčiniteľ oslabenia sálania trojatómovými plynmi a vodnými parami:

Súčiniteľ oslabenia sálania trojatómovými plynmi a vodnými parami závesných rúr je rovnaký ako súčiniteľ oslabenia sálania trojatómovými plynmi a vodnými parami teplovýmennej plochy PP1 ktorá je na závesných rúrach zavesená, teda $k_s = 25,383 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$.

Optická hustota spalín:

Optická hustota spalín závesných rúr je rovnaká ako optická hustota spalín teplovýmennej plochy PP1 ktorá je na závesných rúrach zavesená, teda $k \cdot p \cdot s = 0,258$.

Stupeň čiernosti prúdu spalín:

Stupeň čiernosti prúdu spalín závesných rúr je rovnaký ako stupeň čiernosti prúdu spalín teplovýmennej plochy PP1 ktorá je na závesných rúrach zavesená, teda $a = 0,227$.

Výrobná teplovýmenná plocha:

$$S = \pi \cdot D \cdot h \cdot i \text{ [m}^2\text{]} \quad (10.3 - 47)$$

$$S = \pi \cdot 0,038 \cdot 2,3 \cdot 20$$

$$S = 5,491 \text{ m}^2$$

Predbežne teplo odobrané závesnými rúrami spalinám:

$$Q_1 = (M_{pp} - M_v) \cdot (i_{zr}^{out} - i_{zr}^{in}) \text{ [kW]} \quad (10.3 - 48)$$

$$Q_1 = (6,11 - 0,3) \cdot (2785 - 2777,680)$$

$$Q_1 = 42,529 \text{ kW}$$

Teplota zaneseného povrchu rúr na strane spalín:

Súčiniteľ zanesenia volím $\varepsilon = 0,002 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$.

$$t_{za} = t_{Pstr} + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{Q_1}{S} \cdot 10^3 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (10.3 - 49)$$

$$t_{za} = 305,25 + \left(0,002 + \frac{1}{2842,718} \right) \cdot \frac{42,529}{5,491} \cdot 10^3$$

$$t_{za} = 323,465 \text{ }^\circ\text{C}$$

Súčiniteľ prestupu tepla sálaním:

Stupeň čiernosti zanesených stien sálavých plôch volím $a_{za} = 0,8$.

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{za} + 1}{2} \cdot a \cdot (t_{str} + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{t_{za} + 273,15}{t_{str} + 273,15} \right)^4}{1 - \frac{t_{za} + 273,15}{t_{str} + 273,15}} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (10.3 - 50)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,227 \cdot (460,5 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{323,465 + 273,15}{460,5 + 273,15} \right)^4}{1 - \frac{323,465 + 273,15}{460,5 + 273,15}}$$

$$\alpha_{sal} = 13,851 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Celkový súčiniteľ prestupu tepla:

Súčiniteľ omývania volím $\omega = 1$.

$$\alpha_s = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_{sal}) \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (10.3 - 51)$$

$$\alpha_s = 1 \cdot (44,951 + 13,851)$$

$$\alpha_s = 58,802 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Súčiniteľ prestupu tepla:

$$k = \frac{\alpha_s}{1 + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_k} \right) \cdot \alpha_s} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (10.3 - 52)$$

$$k = \frac{58,802}{1 + \left(0,002 + \frac{1}{2842,718} \right) \cdot 58,802}$$

$$k = 51,658 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Logaritmický rozdiel teplôt:

$$\Delta t_1 = t_1 - t_{zr}^{in} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (10.3 - 53)$$

$$\Delta t_1 = 506 - 304,5$$

$$\Delta t_1 = 201,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_{zr}^{out} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (10.3 - 54)$$

$$\Delta t_2 = 415 - 306$$

$$\Delta t_2 = 109 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (10.3 - 55)$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{201,5 - 109}{\ln \frac{201,5}{109}}$$

$$\Delta t_{ln} = 150,543 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Teplo odobrané závesnými rúrami:

$$Q_{Zr} = k \cdot S \cdot \Delta t_{ln} \cdot 10^{-3} \text{ [kW]} \quad (10.3 - 56)$$

$$Q_{Zr} = 51,658 \cdot 5,491 \cdot 150,543 \cdot 10^{-3}$$

$$Q_{Zr} = 42,702 \text{ kW}$$

Prepočet entalpie výstupnej pary zo závesných rúr:

$$i_{Zr}^{out} = \frac{Q_{Zr} + (M_{pp} - M_v) \cdot i_{Zr}^{in}}{M_{pp} - M_v} \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (10.3 - 57)$$

$$i_{Zr}^{out} = \frac{42,702 + (6,11 - 0,3) \cdot 2777,680}{6,11 - 0,3}$$

$$i_{Zr}^{out} = 2785,029 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Tejto hodnote entalpie a tlaku približne zodpovedá teplota 306 °C ktorá sa zhoduje so zvolenou teplotou pary na výstupe zo závesných rúr.

Prepočet teploty spalín na výstupe z 3. časti III. ťahu:

Celkové teplo:

$$Q_C = Q_{PP1} + Q_{vyp} + Q_{Zr} \text{ [kW]} \quad (10.3 - 58)$$

$$Q_C = 1015,007 + 140,843 + 42,702$$

$$Q_C = 1198,552 \text{ kW}$$

Teplo spalín na vstupe:

$$Q_{in} = I_{2. III.}^s \cdot M_{pv} \text{ [kW]} \quad (10.3 - 59)$$

$$Q_{in} = 3367,289 \cdot 1,876$$

$$Q_{in} = 6317,034 \text{ kW}$$

Teplo spalín na výstupe:

$$Q_{out} = Q_{in} - Q_C \text{ [kW]} \quad (10.3 - 60)$$

$$Q_{out} = 6317,034 - 1198,552$$

$$Q_{out} = 5118,482 \text{ kW}$$

Entalpia spalín za druhou časťou III. ťahu kotla:

$$I_{3. III.}^s = \frac{Q_{out}}{M_{pv}} \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (10.3 - 61)$$

$$I_{3. III.}^s = \frac{5118,482}{1,876}$$

$$I_{3. III.}^s = 2728,402 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Podľa I – t diagramu je teplota spalín za 3. časťou III. ťahu 415 °C čo sa zhoduje so zvolenou teplotou.

11 Výpočet štvrtého a piateho ťahu kotla

Štvrtý a piaty ťah kotla je konštruovaný ako plechový kanál v ktorom sú teplovýmenné plochy zavesené na nechladených závesoch, je zložený z ohrievača vody (EKO) a ohrievača vzduchu (OVZ). Ohrievač vody je rozdelený na dve časti a taktiež ohrievač vzduchu je rozdelený na viac častí z dôvodu vysokej teploty vzduchu privádzaného do kotla 240 °C.

Geometria IV. a V. ťahu:

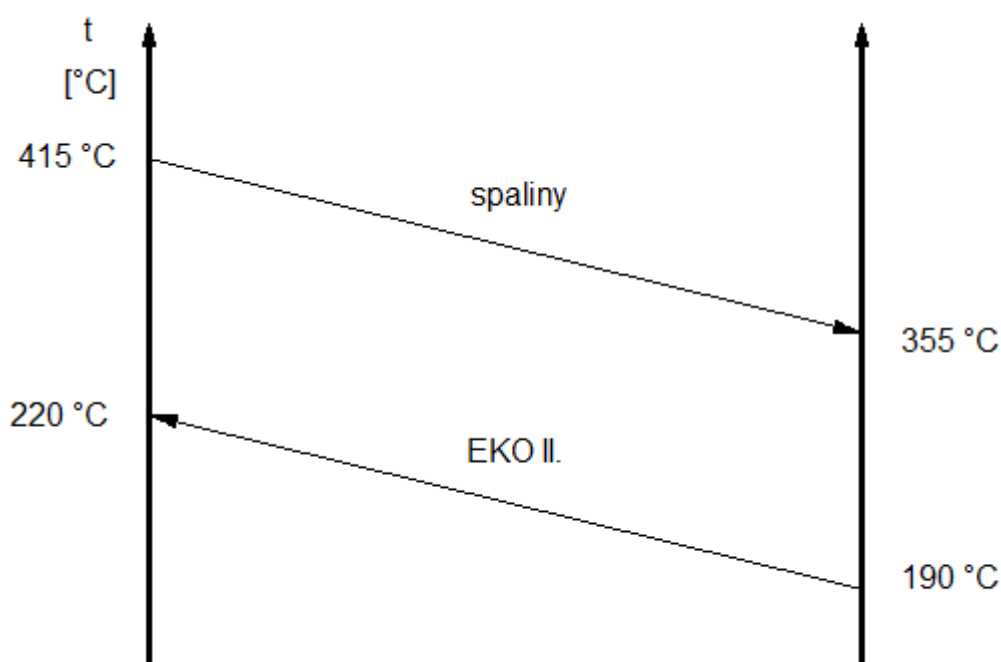
predná stena $a = 2,5 \text{ m}$

bočná stena $b = 2,9 \text{ m}$

11.1 Výpočet druhej časti ohrievača vody (EKO II.)

Súčiniteľ prestupu tepla sálaním zanedbávam pretože teplota spalín ktoré prúdia cez ohrievač vzduchu je nižšia ako 500 °C.

Obr. 11.1 Diagram teplôt 2. časti ohrievača vody



Teplota spalín na vstupe

$$t_1 = 415 \text{ °C}$$

Teplota spalín na výstupe

$$t_2 = 355 \text{ °C}$$

Entalpia spalín na vstupe

$$I_{3, \text{III.}}^s = 2728,402 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Entalpia spalín na výstupe

$$I_{\text{EKO II.}}^s = 2316,65 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Teplota vody na vstupe

$$t_{\text{EKO II.}}^{\text{in}} = 190 \text{ °C}$$

Teplota vody na výstupe

$$t_{\text{EKO II.}}^{\text{out}} = 220 \text{ °C}$$

Tlak vody na vstupe

$$p_{\text{EKO II.}}^{\text{in}} = 8,65 \text{ MPa}$$

Tlak vody na výstupe

$$p_{\text{EKO II.}}^{\text{out}} = 8,55 \text{ MPa}$$

Entalpia vody na vstupe	$i_{\text{EKO II.}}^{\text{in}} = 810,85 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Entalpia vody na výstupe	$i_{\text{EKO II.}}^{\text{out}} = 944,83 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Objem vody na vstupe	$v_{\text{in}} = 0,001134 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Objem vody na výstupe	$v_{\text{out}} = 0,001183 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

Stredná teplota spalín:

$$t_{\text{str}} = \frac{t_1 + t_2}{2} [^{\circ}\text{C}] \quad (11.1 - 1)$$

$$t_{\text{str}} = \frac{415 + 355}{2}$$

$$t_{\text{str}} = 385 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Stredný objem vody:

$$v_v = \frac{v_{\text{in}} + v_{\text{out}}}{2} [^{\circ}\text{C}] \quad (11.1 - 2)$$

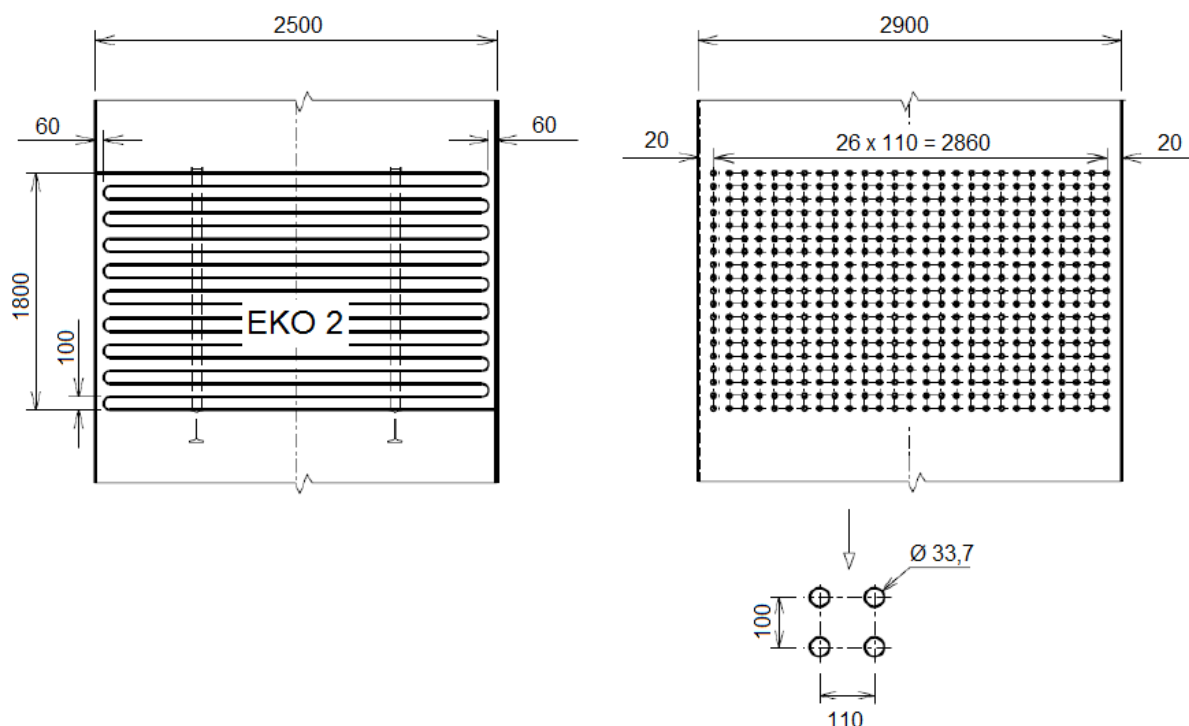
$$v_v = \frac{0,001134 + 0,001183}{2}$$

$$v_v = 0,0011585 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Rozmery zväzku druhej časti ohrievača vody EKO II.:

Vonkajší priemer rúr	$D = 0,0337 \text{ m}$
Vnútorňý priemer rúr	$d = 0,0265 \text{ m}$
Priečny rozostúp	$s_1 = 0,11 \text{ m}$
Pozdĺžny rozostúp	$s_2 = 0,1 \text{ m}$
Počet rúr v rade	$z_1 = 27$
Počet radov	$z_2 = 19$
Výška	$h = 1,8$

Obr. 11.2 Konštrukčná charakteristika ohrievača vody č.2



Svetlý prierez spalín:

$$S_{sp} = a \cdot b - D \cdot l_e \cdot z_1 \text{ [m}^2\text{]} \quad (11.1 - 3)$$

$$S_{sp} = 2,5 \cdot 2,9 - 0,0337 \cdot 2,38 \cdot 27$$

$$S_{sp} = 5,084 \text{ m}^2$$

Rýchlosť vody v rúrach ohrievača vody EKO II:

$$w_v = \frac{4 \cdot (M_{pp} - M_v) \cdot v_v}{z_1 \cdot \pi \cdot d^2} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]} \quad (11.1 - 4)$$

$$w_v = \frac{4 \cdot (6,11 - 0,3) \cdot 0,0011585}{27 \cdot \pi \cdot 0,0265^2}$$

$$w_v = 0,451 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Rýchlosť spalín:

$$w_s = \frac{V_s}{S_{sp}} \cdot \frac{273,15 + t_{str}}{273,15} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]} \quad (11.1 - 5)$$

$$w_s = \frac{8,242}{5,084} \cdot \frac{273,15 + 385}{273,15}$$

$$w_s = 3,906 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou na strane spalín:

Hodnoty pre strednú teplotu 385 °C:

Súčiniteľ tepelnej vodivosti spalín

$$\lambda_s = 5,691 \cdot 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Kinematická viskozita

$$\nu_s = 60,234 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Prandtlovo číslo

$$\text{Pr} = 0,6401$$

Nakoľko je počet radov rúr ohrievača vody EKO II. z_2 väčší ako 10 je korekcia na počet radov rúr $C_z = 1$. Taktiež korekcia na geometrickú konfiguráciu zväzku $C_s = 1$ keďže $\sigma_{pz} = \frac{s_2}{d}$ je väčšie ako 2.

$$\alpha_k = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left(\frac{w_s \cdot D}{v_s} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (11.1 - 6)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{5,691 \cdot 10^{-2}}{0,0337} \cdot \left(\frac{3,906 \cdot 0,0337}{60,234 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,65} \cdot 0,6401^{0,33}$$

$$\alpha_k = 43,185 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$$

Výrobná teplovýmenná plocha:

$$S = \pi \cdot D \cdot l_e \cdot z_1 \cdot z_2 [m^2] \quad (11.1 - 7)$$

$$S = \pi \cdot 0,0337 \cdot 2,38 \cdot 27 \cdot 19$$

$$S = 129,262 m^2$$

Súčiniteľ prestupu tepla:

Súčiniteľ zanesenia volím $\varepsilon = 0,0061 m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$.

$$k = \frac{\alpha_s}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_s} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (11.1 - 8)$$

$$k = \frac{43,185}{1 + 0,0061 \cdot 43,185}$$

$$k = 34,180 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

Logaritmickej rozdiel teplôt:

$$\Delta t_1 = t_1 - t_{EKO II.}^{out} [^{\circ}C] \quad (11.1 - 9)$$

$$\Delta t_1 = 415 - 220$$

$$\Delta t_1 = 195 ^{\circ}C$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_{EKO II.}^{in} [^{\circ}C] \quad (11.1 - 10)$$

$$\Delta t_2 = 355 - 190$$

$$\Delta t_2 = 165 ^{\circ}C$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} [^{\circ}C] \quad (11.1 - 11)$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{195 - 165}{\ln \frac{195}{165}}$$

$$\Delta t_{ln} = 179,582 ^{\circ}C$$

Tepelný výkon druhej časti ohrievača vody:

$$Q_{EKO II.} = (M_{pp} + M_o - M_v) \cdot (i_{EKO II.}^{out} - i_{EKO II.}^{in}) [kW] \quad (11.1 - 12)$$

$$Q_{EKO II.} = (6,11 + 0,04 - 0,3) \cdot (944,83 - 810,85)$$

$$Q_{EKO II.} = 783,783 kW$$

Veľkosť výhrevnej plochy:

$$S_{\text{EKO II.}} = \frac{Q_{\text{EKO II.}}}{k \cdot \Delta t_{\text{ln}}} \cdot 10^3 \text{ [m}^2\text{]} \quad (11.1 - 13)$$

$$S_{\text{EKO II.}} = \frac{783,783}{34,180 \cdot 179,582} \cdot 10^3$$

$$S_{\text{EKO II.}} = 127,691 \text{ m}^2$$

Veľkosť výhrevných plôch sa od seba líši o 1,21 %.

Prepočet teploty spalín na výstupe z druhej časti ohrievača vody EKO II.:

Teplota spalín na výstupe:

$$Q_{\text{out}} = Q_{\text{in}} - Q_{\text{C}} \text{ [kW]} \quad (11.1 - 14)$$

$$Q_{\text{out}} = 5118,482 - 783,783$$

$$Q_{\text{out}} = 4334,699 \text{ kW}$$

Entalpia spalín za druhou časťou ohrievača vody:

$$I_{\text{EKO II.}}^s = \frac{Q_{\text{out}}}{M_{\text{pv}}} \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}\text{]} \quad (11.1 - 15)$$

$$I_{\text{EKO II.}}^s = \frac{4334,699}{1,876}$$

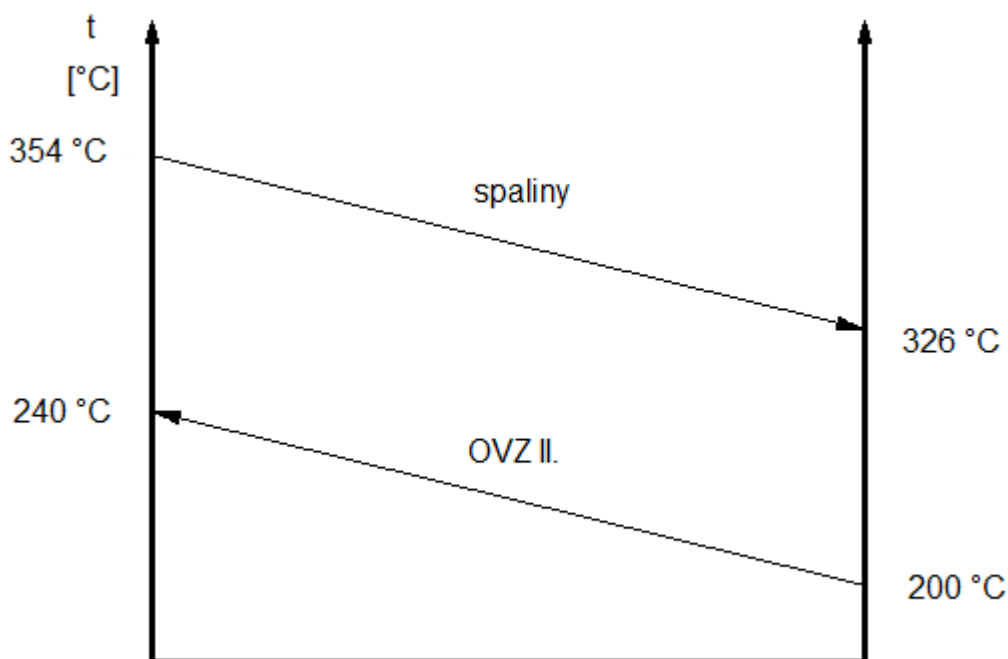
$$I_{\text{EKO II.}}^s = 2310,607 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Podľa I – t diagramu je teplota spalín za druhou časťou ohrievača vody EKO II. 354 °C čo sa od zvolenej teploty líši o 1 °C teda o 0,28 %.

11.2 Výpočet druhej časti ohrievača vzduchu (OVZ II):

Z dôvodu abrázie volím usporiadanie rúr za sebou, zapojenie ako protiprúd. Vzduchu prechádza rúrami a spaliny ich obtekajú.

Obr. 11.3 Diagram teplôt 2. časti ohrievača vzduchu



Teplota spalín na vstupe

$$t_1 = 354 \text{ °C}$$

Teplota spalín na výstupe

$$t_2 = 326 \text{ °C}$$

Entalpia spalín na vstupe

$$I_{\text{EKO II.}}^{\text{s}} = 2310,607 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Entalpia spalín na výstupe

$$I_{\text{OVZ II.}}^{\text{s}} = 2117,820 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Teplota vzduchu na vstupe

$$t_{\text{OVZ II.}}^{\text{in}} = 200 \text{ °C}$$

Teplota vzduchu na výstupe

$$t_{\text{OVZ II.}}^{\text{out}} = 240 \text{ °C}$$

Entalpia vzduchu na vstupe

$$I_{\text{OVZ II.}}^{\text{in}} = 719 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Entalpia vzduchu na výstupe

$$I_{\text{OVZ II.}}^{\text{out}} = 866,6 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Stredná teplota spalín:

$$t_{\text{str}}^{\text{s}} = \frac{t_1 + t_2}{2} \text{ [°C]} \quad (11.2 - 1)$$

$$t_{\text{str}}^{\text{s}} = \frac{354 + 326}{2}$$

$$t_{\text{str}}^{\text{s}} = 340 \text{ °C}$$

Stredná teplota vzduchu:

$$t_{\text{str}}^{\text{v}} = \frac{t_{\text{OVZ II.}}^{\text{in}} + t_{\text{OVZ II.}}^{\text{out}}}{2} \text{ [°C]} \quad (11.2 - 2)$$

$$t_{\text{str}}^{\text{v}} = \frac{200 + 240}{2}$$

$$t_{\text{str}}^{\text{v}} = 220 \text{ °C}$$

Rozmery zväzku druhej časti ohrievača vzduchu OVZ II.:

Vonkajší priemer rúr

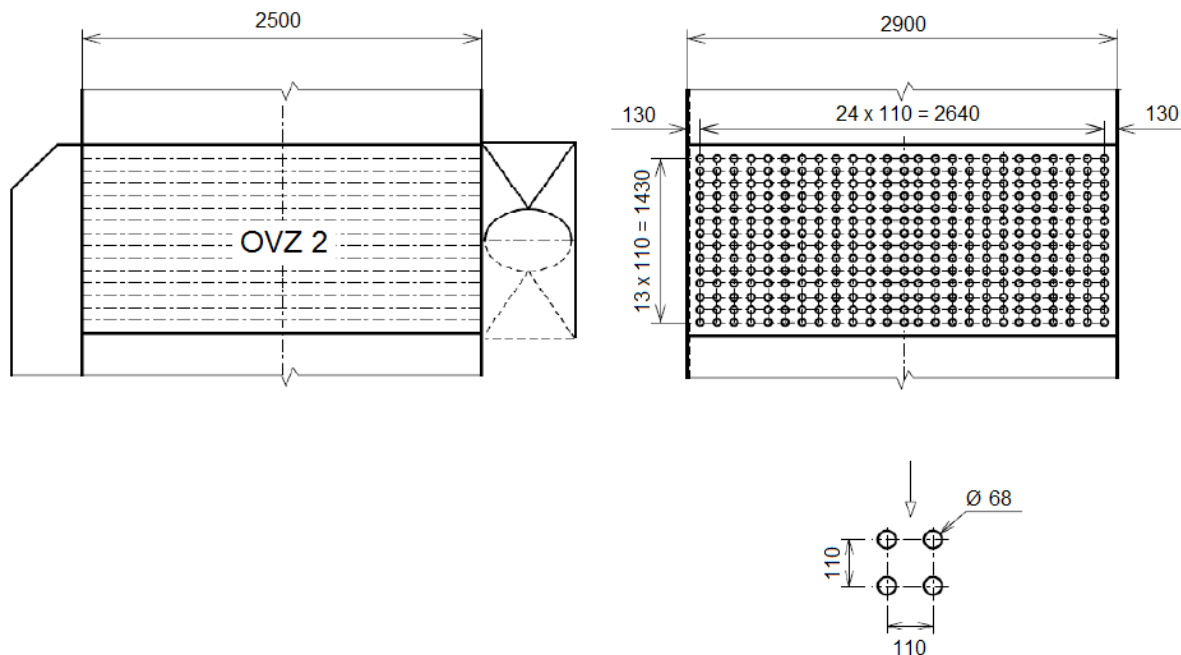
$$D = 0,068 \text{ m}$$

Vnútorý priemer rúr

$$d = 0,0628 \text{ m}$$

Priečný rozostúp	$s_1 = 0,11 \text{ m}$
Pozdĺžny rozostúp	$s_2 = 0,11 \text{ m}$
Počet rúr v rade	$z_1 = 25$
Počet radov	$z_2 = 14$
Výška	$h = 1,43$

Obr. 11.4 Konštrukčná charakteristika ohrievača vzduchu č.2



Tepelný výkon druhej časti ohrievača vzduchu OVZ II.:

$$Q_{OVZ II.} = M_{pv} \cdot (\beta_{OVZ}^1 \cdot I_{OVZ II.}^{out} - \beta_{OVZ}^2 \cdot I_{OVZ II.}^{in}) \text{ [kW]} \quad (11.2 - 3)$$

$$Q_{OVZ II.} = 1,876 \cdot (1,3 \cdot 866,6 - 1,3 \cdot 719)$$

$$Q_{OVZ II.} = 359,966 \text{ kW}$$

Entalpia spalín na výstupe z druhej časti ohrievača vzduchu OVZ II.:

$$I_{OVZ II.}^s = I_{EKO II.}^s - \frac{Q_{OVZ II.} + \frac{Q_{sOVZ}}{2}}{M_{pv}} \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (11.2 - 4)$$

$$I_{OVZ II.}^s = 2310,607 - \frac{359,966 + \frac{3,402}{2}}{1,876}$$

$$I_{OVZ II.}^s = 2117,820 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Svetlý prierez spalín:

$$S_{sp} = a \cdot b - D \cdot l_e \cdot z_1 \text{ [m}^2] \quad (11.2 - 5)$$

$$S_{sp} = 2,5 \cdot 2,9 - 0,068 \cdot 2,5 \cdot 25$$

$$S_{sp} = 3 \text{ m}^2$$

Rýchlosť spalín:

$$w_s = \frac{V_s}{S_{sp}} \cdot \frac{273,15 + t_{str}^s}{273,15} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (11.2 - 6)$$

$$w_s = \frac{8,242}{3} \cdot \frac{273,15 + 340}{273,15}$$

$$w_s = 6,167 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Svetlý prierez vzduchu:

$$S_v = z_1 \cdot z_2 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \text{ [m}^2] \quad (11.2 - 7)$$

$$S_v = 25 \cdot 14 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0628^2}{4}$$

$$S_v = 1,084 \text{ m}^2$$

Objemový prietok vzduchu:

$$V_v = M_{pv} \cdot \alpha \cdot O_{vz, \min}^v \text{ [Nm}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (11.2 - 8)$$

$$V_v = 1,876 \cdot 1,3 \cdot 2,698$$

$$V_v = 6,579 \text{ Nm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Rýchlosť vzduchu:

$$w_v = \frac{V_v}{S_v} \cdot \frac{273,15 + t_{str}^v}{273,15} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (11.2 - 9)$$

$$w_v = \frac{6,579}{1,084} \cdot \frac{273,15 + 220}{273,15}$$

$$w_v = 10,957 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou na strane spalín:

Hodnoty pre strednú teplotu 340 °C:

$$\text{Súčiniteľ tepelnej vodivosti spalín} \quad \lambda_s = 5,304 \cdot 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\text{Kinematická viskozita} \quad \nu_s = 53,667 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{Prandtlovo číslo} \quad \text{Pr} = 0,6446$$

Nakoľko je počet radov rúr ohrievača vody EKO II. z_2 väčší ako 10 je korekcia na počet radov rúr $C_z = 1$.

Korekcia na geometrickú konfiguráciu zväzku:

$$C_s = \left[1 + \left(2 \cdot \frac{s_1}{d} - 3 \right) \cdot \left(1 - \frac{s_2}{2} \right)^3 \right]^{-2} \quad (11.2 - 10)$$

$$C_s = \left[1 + \left(2 \cdot \frac{0,11}{0,0628} - 3 \right) \cdot \left(1 - \frac{0,11}{2} \right)^3 \right]^{-2}$$

$$C_s = 0,998$$

$$\alpha_k^s = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left(\frac{w_s \cdot D}{v_s} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (11.2 - 11)$$

$$\alpha_k^s = 0,2 \cdot 1 \cdot 0,998 \cdot \frac{5,304 \cdot 10^{-2}}{0,068} \cdot \left(\frac{6,167 \cdot 0,068}{53,667 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,65} \cdot 0,6446^{0,33}$$

$$\alpha_k^s = 45,676 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$$

Teplota steny:

$$t_{st} = \frac{t_{str}^s + t_{str}^v}{2} [^{\circ}C] \quad (11.2 - 12)$$

$$t_{st} = \frac{340 + 220}{2}$$

$$t_{st} = 280 ^{\circ}C$$

Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou na strane vzduchu:

Hodnoty pre strednú teplotu 220 °C:

$$\text{Súčiniteľ tepelnej vodivosti spalín} \quad \lambda_v = 4,016 \cdot 10^{-2} W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$$

$$\text{Kinematická viskozita} \quad v_v = 37,48 \cdot 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}$$

$$\text{Prandtlovo číslo} \quad Pr_v = 0,69$$

Opravný súčiniteľ:

$$C_t = \left(\frac{t_{str}^v}{t_{st}} \right)^{0,5} \quad (11.2 - 13)$$

$$C_t = \left(\frac{220}{280} \right)^{0,5}$$

$$C_t = 0,886$$

$$\alpha_k^v = 0,023 \cdot \frac{\lambda_v}{d} \cdot \left(\frac{w_v \cdot d}{v_v} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot C_t [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (11.2 - 14)$$

$$\alpha_k^v = 0,023 \cdot \frac{4,016 \cdot 10^{-2}}{0,0628} \cdot \left(\frac{10,957 \cdot 0,0628}{37,48 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,69^{0,4} \cdot 0,886$$

$$\alpha_k^v = 28,947 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$$

Súčiniteľ prestupu tepla:

Súčiniteľ zanesenia volím $\varepsilon = 0,0057 m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$.

$$k = \frac{\alpha_k^s}{1 + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_k^v} \right) \cdot \alpha_k^s} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (11.2 - 15)$$

$$k = \frac{45,676}{1 + \left(0,0057 + \frac{1}{28,947} \right) \cdot 45,676}$$

$$k = 16,092 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

Logaritmický rozdiel teplôt:

$$\Delta t_1 = t_1 - t_{OVZ II.}^{out} [^{\circ}C] \quad (11.2 - 16)$$

$$\Delta t_1 = 354 - 240$$

$$\Delta t_1 = 114 ^{\circ}C$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_{OVZ II.}^{in} [^{\circ}C] \quad (11.2 - 17)$$

$$\Delta t_2 = 326 - 200$$

$$\Delta t_2 = 126 ^{\circ}C$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}} [^{\circ}C] \quad (11.2 - 18)$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{126 - 114}{\ln \frac{126}{114}}$$

$$\Delta t_{ln} = 119,899 ^{\circ}C$$

Veľkosť výhrevnej plochy:

$$S_{OVZ II.} = \frac{Q_{OVZ II.}}{k \cdot \Delta t_{ln}} \cdot 10^3 [m^2] \quad (11.2 - 19)$$

$$S_{OVZ II.} = \frac{359,966}{16,092 \cdot 119,899} \cdot 10^3$$

$$S_{OVZ II.} = 186,567 m^2$$

Výrobná teplovýmenná plocha:

$$S = \pi \cdot D \cdot l_e \cdot z_1 \cdot z_2 [m^2] \quad (11.2 - 20)$$

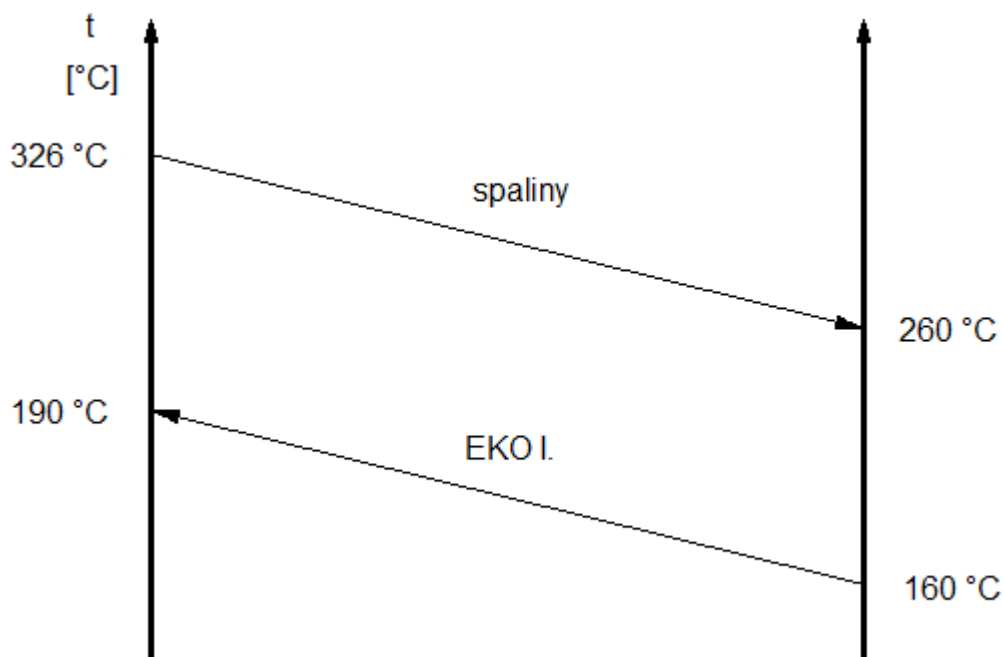
$$S = \pi \cdot 0,068 \cdot 2,5 \cdot 25 \cdot 14$$

$$S = 186,924 m^2$$

Veľkosť výhrevných plôch sa od seba líši o 0,19 %.

11.3 Výpočet prvej časti ohrievača vody (EKO I.)

Obr. 11.5 Diagram teplôt 1. časti ohrievača vody



Teplota spalín na vstupe

$$t_1 = 326 \text{ °C}$$

Teplota spalín na výstupe

$$t_2 = 260 \text{ °C}$$

Entalpia spalín na vstupe

$$I_{\text{OVZ II.}}^s = 2117,820 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Entalpia spalín na výstupe

$$I_{\text{EKO I.}}^s = 1675 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Teplota vody na vstupe

$$t_{\text{EKO I.}}^{\text{in}} = 160 \text{ °C}$$

Teplota vody na výstupe

$$t_{\text{EKO I.}}^{\text{out}} = 190 \text{ °C}$$

Tlak vody na vstupe

$$p_{\text{EKO I.}}^{\text{in}} = 8,75 \text{ MPa}$$

Tlak vody na výstupe

$$p_{\text{EKO I.}}^{\text{out}} = 8,65 \text{ MPa}$$

Entalpia vody na vstupe

$$i_{\text{EKO II.}}^{\text{in}} = 670 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Entalpia vody na výstupe

$$i_{\text{EKO II.}}^{\text{out}} = 810,85 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Objem vody na vstupe

$$v_{\text{in}} = 0,001095 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Objem vody na výstupe

$$v_{\text{out}} = 0,001134 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Stredná teplota spalín:

$$t_{\text{str}} = \frac{t_1 + t_2}{2} \text{ [°C]}$$

(11.3 - 1)

$$t_{\text{str}} = \frac{326 + 260}{2}$$

$$t_{\text{str}} = 293 \text{ °C}$$

Stredný objem vody:

$$v_v = \frac{v_{in} + v_{out}}{2} [^{\circ}\text{C}] \quad (11.3 - 2)$$

$$v_v = \frac{0,001095 + 0,001134}{2}$$

$$v_v = 0,0011145 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Rozmery zväzku druhej časti ohrievača vody EKO I.:

Vonkajší priemer rúr $D = 0,0337 \text{ m}$

Vnútorňý priemer rúr $d = 0,0265 \text{ m}$

Priečny rozostúp $s_1 = 0,11 \text{ m}$

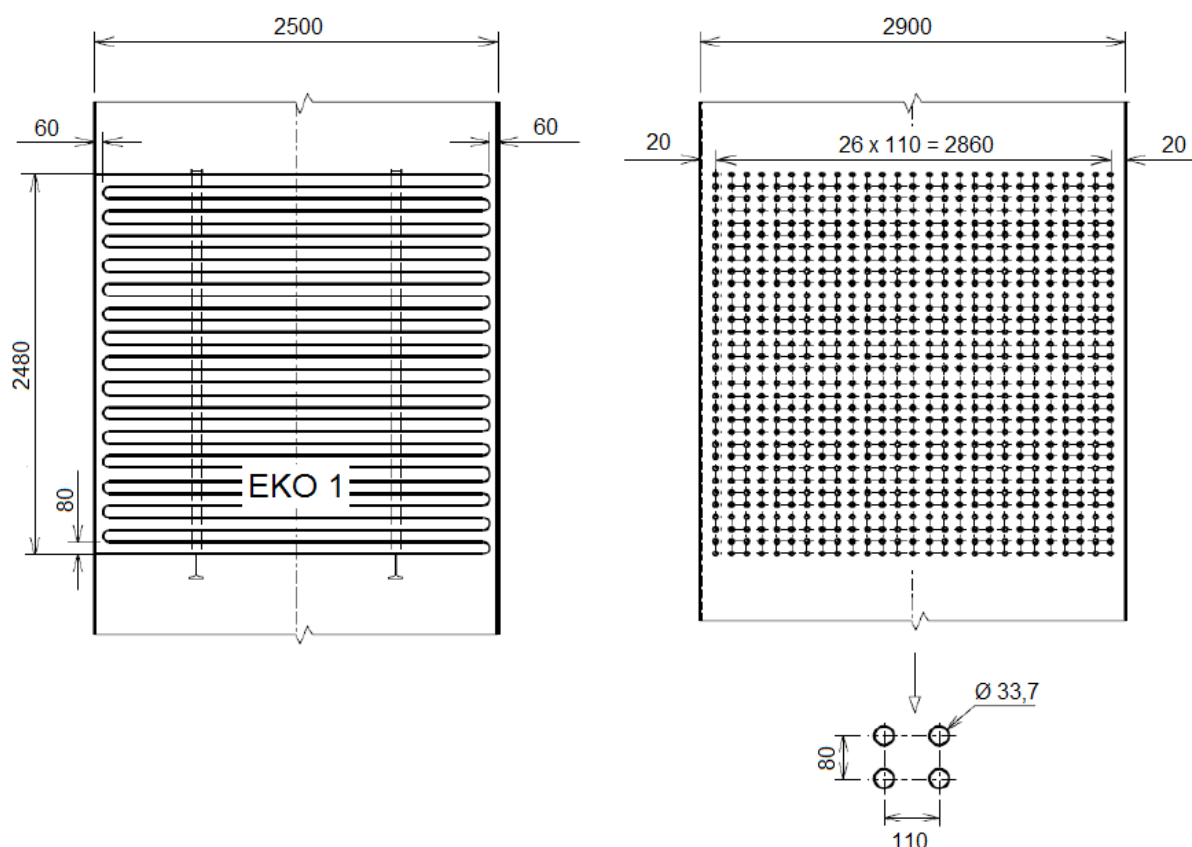
Pozdĺžny rozostúp $s_2 = 0,08 \text{ m}$

Počet rúr v rade $z_1 = 27$

Počet radov $z_2 = 32$

Výška $h = 2,48$

Obr. 11.6 Konštrukčná charakteristika ohrievača vody č. 1



Svetlý prierez spalín:

$$S_{sp} = a \cdot b - D \cdot l_e \cdot z_1 [\text{m}^2] \quad (11.3 - 3)$$

$$S_{sp} = 2,5 \cdot 2,9 - 0,0337 \cdot 2,38 \cdot 27$$

$$S_{sp} = 5,084 \text{ m}^2$$

Rýchlosť vody v rúrach ohrievača vody EKO I:

$$w_v = \frac{4 \cdot (M_{pp} - M_v) \cdot v_v}{z_1 \cdot \pi \cdot d^2} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (11.3 - 4)$$

$$w_v = \frac{4 \cdot (6,11 - 0,3) \cdot 0,0011145}{27 \cdot \pi \cdot 0,0265^2}$$

$$w_v = 0,434 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Rýchlosť spalín:

$$w_s = \frac{V_s}{S_{sp}} \cdot \frac{273,15 + t_{str}}{273,15} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (11.3 - 5)$$

$$w_s = \frac{8,242}{5,084} \cdot \frac{273,15 + 293}{273,15}$$

$$w_s = 3,36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou na strane spalín:

Hodnoty pre strednú teplotu 293 °C:

Súčiniteľ tepelnej vodivosti spalín

$$\lambda_s = 4,883 \cdot 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Kinematická viskozita

$$\nu_s = 46,538 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Prandtlovo číslo

$$\text{Pr} = 0,6495$$

Nakoľko je počet radov rúr ohrievača vody EKO I. z_2 väčší ako 10 je korekcia na počet radov rúr $C_z = 1$. Taktiež korekcia na geometrickú konfiguráciu zväzku $C_s = 1$ keďže $\sigma_{pz} = \frac{s_2}{d}$ je väčšie ako 2.

$$\alpha_k = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left(\frac{w_s \cdot D}{\nu_s} \right)^{0,65} \cdot \text{Pr}^{0,33} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (11.3 - 6)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{4,883 \cdot 10^{-2}}{0,0337} \cdot \left(\frac{3,36 \cdot 0,0337}{46,538 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,65} \cdot 0,6495^{0,33}$$

$$\alpha_k = 39,924 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Výrobná teplovýmenná plocha:

$$S = \pi \cdot D \cdot l_e \cdot z_1 \cdot z_2 \quad [\text{m}^2] \quad (11.3 - 7)$$

$$S = \pi \cdot 0,0337 \cdot 2,38 \cdot 27 \cdot 32$$

$$S = 217,706 \text{ m}^2$$

Súčiniteľ prestupu tepla:

Súčiniteľ zanesenia volím $\varepsilon = 0,0057 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$.

$$k = \frac{\alpha_k}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_k} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (11.3 - 8)$$

$$k = \frac{39,924}{1 + 0,0057 \cdot 39,924}$$

$$k = 32,522 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Logaritmický rozdiel teplôt:

$$\Delta t_1 = t_1 - t_{\text{EKO I.}}^{\text{out}} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (11.3 - 9)$$

$$\Delta t_1 = 326 - 190$$

$$\Delta t_1 = 136 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_{\text{EKO I.}}^{\text{in}} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (11.3 - 10)$$

$$\Delta t_2 = 260 - 160$$

$$\Delta t_2 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{\text{ln}} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (11.3 - 11)$$

$$\Delta t_{\text{ln}} = \frac{136 - 100}{\ln \frac{136}{100}}$$

$$\Delta t_{\text{ln}} = 117,078 \text{ }^\circ\text{C}$$

Teplný výkon prvej časti ohrievača vody:

$$Q_{\text{EKO I.}} = (M_{\text{pp}} + M_o - M_v) \cdot (i_{\text{EKO I.}}^{\text{out}} - i_{\text{EKO I.}}^{\text{in}}) \text{ [kW]} \quad (11.3 - 12)$$

$$Q_{\text{EKO I.}} = (6,11 + 0,04 - 0,3) \cdot (810,85 - 670)$$

$$Q_{\text{EKO I.}} = 823,972 \text{ kW}$$

Veľkosť výhrevnej plochy:

$$S_{\text{EKO I.}} = \frac{Q_{\text{EKO I.}}}{k \cdot \Delta t_{\text{ln}}} \cdot 10^3 \text{ [m}^2\text{]} \quad (11.3 - 13)$$

$$S_{\text{EKO I.}} = \frac{823,972}{32,522 \cdot 117,078} \cdot 10^3$$

$$S_{\text{EKO I.}} = 216,401 \text{ m}^2$$

Veľkosť výhrevných plôch sa od seba líši o 0,59 %.

Prepočet teploty spalín na výstupe z prvej časti ohrievača vody EKO I.:

Tepló spalín na vstupe:

$$Q_{\text{in}} = I_{\text{OVZ II.}}^{\text{s}} \cdot M_{\text{pv}} \text{ [kW]} \quad (11.3 - 14)$$

$$Q_{\text{in}} = 2117,820 \cdot 1,876$$

$$Q_{\text{in}} = 3973,030 \text{ kW}$$

Tepló spalín na výstupe:

$$Q_{\text{out}} = Q_{\text{in}} - Q_{\text{EKO I.}} \text{ [kW]} \quad (11.3 - 15)$$

$$Q_{\text{out}} = 3973,030 - 823,972$$

$$Q_{\text{out}} = 3149,058 \text{ kW}$$

Entalpia spalín za druhou časťou ohrievača vody:

$$I_{\text{EKO II.}}^{\text{s}} = \frac{Q_{\text{out}}}{M_{\text{pv}}} [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (11.3 - 16)$$

$$I_{\text{EKO II.}}^{\text{s}} = \frac{3149,058}{1,876}$$

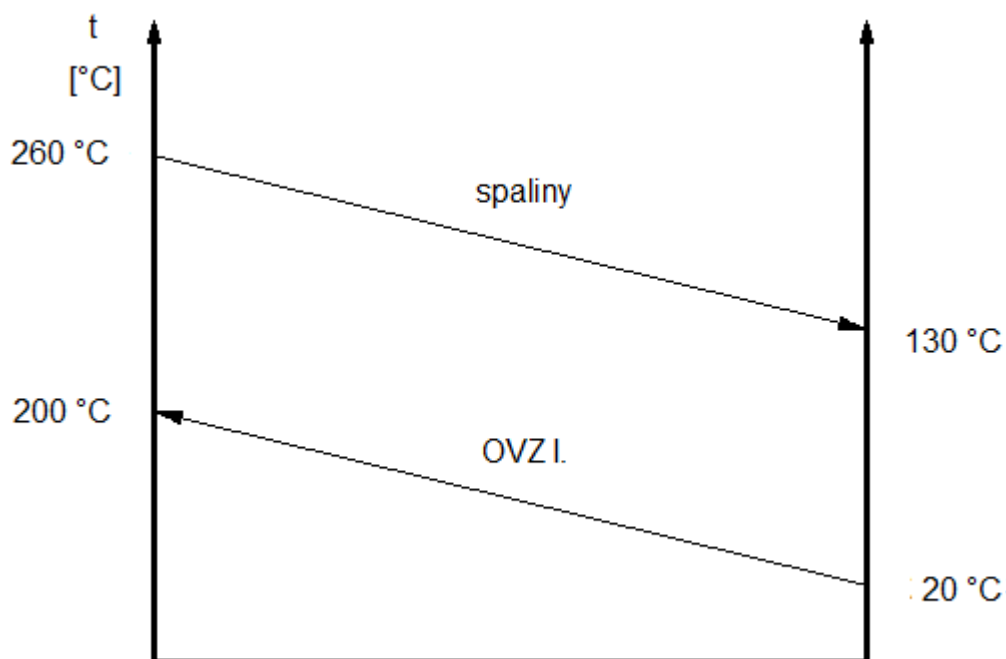
$$I_{\text{EKO II.}}^{\text{s}} = 1678,023 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Podľa I – t diagramu je teplota spalín za prvou časťou ohrievača vody EKO I. 260 °C čo sa zhoduje so zvolenou teplotou.

11.4 Výpočet prvej časti ohrievača vzduchu (OVZ I):

Z dôvodu abrázie volím usporiadanie rúr za sebou, zapojenie ako protiprúd. Vzduchu prechádza rúrami a spaliny ich obtekajú.

Obr. 11.7 Diagram teplôt 1. časti ohrievača vzduchu



Teplota spalín na vstupe

$$t_1 = 260 \text{ °C}$$

Teplota spalín na výstupe

$$t_2 = 130 \text{ °C}$$

Entalpia spalín na vstupe

$$I_{\text{EKO I.}}^{\text{s}} = 1678,023 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Entalpia spalín na výstupe

$$I_{\text{OVZ I.}}^{\text{s}} = 821,395 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Teplota vzduchu na vstupe

$$t_{\text{OVZ I.}}^{\text{in}} = 20 \text{ °C}$$

Teplota vzduchu na výstupe

$$t_{\text{OVZ I.}}^{\text{out}} = 200 \text{ °C}$$

Entalpia vzduchu na vstupe

$$I_{\text{OVZ I.}}^{\text{in}} = 71,3 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Entalpia vzduchu na výstupe

$$I_{\text{OVZ I.}}^{\text{out}} = 719 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Stredná teplota spalín:

$$t_{\text{str}}^s = \frac{t_1 + t_2}{2} [^{\circ}\text{C}] \quad (11.4 - 1)$$

$$t_{\text{str}}^s = \frac{260 + 130}{2}$$

$$t_{\text{str}}^s = 195 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

Stredná teplota vzduchu:

$$t_{\text{str}}^v = \frac{t_{\text{OVZ II.}}^{\text{in}} + t_{\text{OVZ II.}}^{\text{out}}}{2} [^{\circ}\text{C}] \quad (11.4 - 2)$$

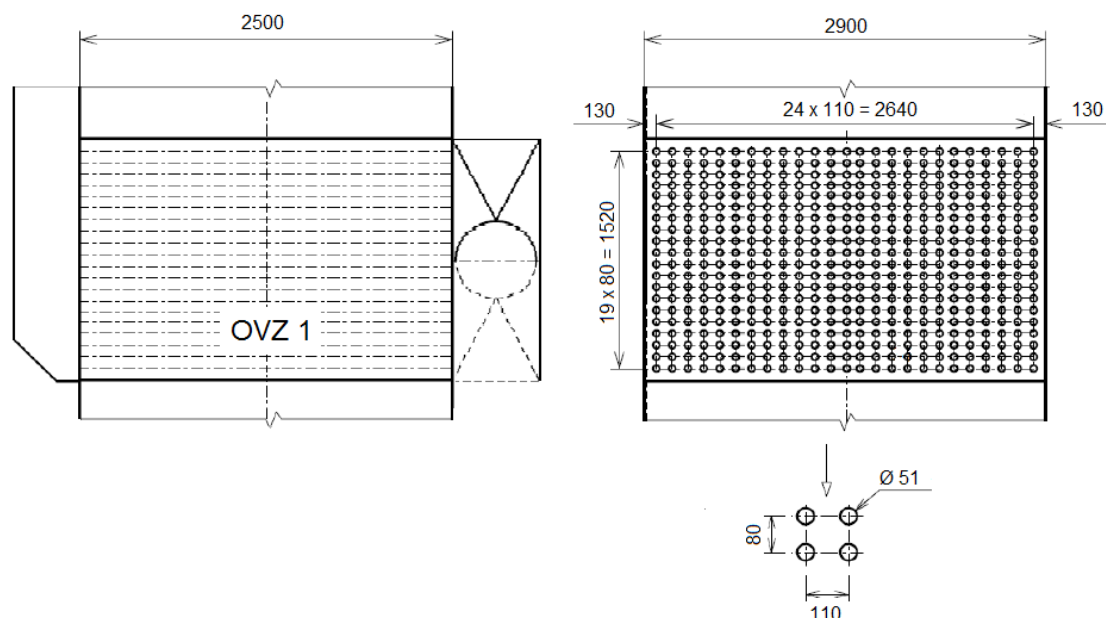
$$t_{\text{str}}^v = \frac{20 + 200}{2}$$

$$t_{\text{str}}^v = 110 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

Rozmery zväzku druhej časti ohrievača vody OVZ I.:

Vonkajší priemer rúr	$D = 0,051 \text{ m}$
Vnútný priemer rúr	$d = 0,0458 \text{ m}$
Priečny rozostúp	$s_1 = 0,11 \text{ m}$
Pozdĺžny rozostúp	$s_2 = 0,08 \text{ m}$
Počet rúr v rade	$z_1 = 25$
Počet radov	$z_2 = 20$
Výška	$h = 1,52$

Obr. 11.8 Konštrukčná charakteristika ohrievača vzduchu č. 1



Tepelný výkon prvej časti ohrievača vzduchu OVZ I.:

$$Q_{\text{OVZ II.}} = M_{\text{pv}} \cdot (\beta_{\text{OVZ}}^1 \cdot I_{\text{OVZ II.}}^{\text{out}} - \beta_{\text{OVZ}}^2 \cdot I_{\text{OVZ II.}}^{\text{in}}) [\text{kW}] \quad (11.4 - 3)$$

$$Q_{\text{OVZ II.}} = 1,876 \cdot (1,3 \cdot 719 - 1,3 \cdot 71,3)$$

$$Q_{\text{OVZ II.}} = 1579,61 \text{ kW}$$

Entalpia spalín na výstupe z prvej časti ohrievača vzduchu OVZ I.:

$$I_{OVZ\ I.}^s = I_{EKO\ I.}^s - \frac{Q_{OVZ\ II.} + \frac{Q_{sOVZ}}{2}}{M_{pv}} \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (11.4 - 4)$$

$$I_{OVZ\ I.}^s = 1678,023 - \frac{1579,61 + \frac{3,402}{2}}{1,876}$$

$$I_{OVZ\ I.}^s = 835,106 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Svetlý prierez spalín:

$$S_{sp} = a \cdot b - D \cdot l_e \cdot z_1 \text{ [m}^2] \quad (11.4 - 5)$$

$$S_{sp} = 2,5 \cdot 2,9 - 0,051 \cdot 2,5 \cdot 25$$

$$S_{sp} = 4,062 \text{ m}^2$$

Rýchlosť spalín:

$$w_s = \frac{V_s}{S_{sp}} \cdot \frac{273,15 + t_{str}^s}{273,15} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (11.4 - 6)$$

$$w_s = \frac{8,242}{4,062} \cdot \frac{273,15 + 195}{273,15}$$

$$w_s = 3,477 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Svetlý prierez vzduchu:

$$S_v = z_1 \cdot z_2 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \text{ [m}^2] \quad (11.4 - 7)$$

$$S_v = 25 \cdot 20 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0458^2}{4}$$

$$S_v = 0,823 \text{ m}^2$$

Rýchlosť vzduchu:

$$w_v = \frac{V_v}{S_v} \cdot \frac{273,15 + t_{str}^v}{273,15} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (11.4 - 8)$$

$$w_v = \frac{6,579}{0,823} \cdot \frac{273,15 + 110}{273,15}$$

$$w_v = 11,213 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou na strane spalín:

Hodnoty pre strednú teplotu 195 °C:

Súčiniteľ tepelnej vodivosti spalín

$$\lambda_s = 4,101 \cdot 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Kinematická viskozita

$$\nu_s = 34,231 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Prandtlovo číslo

$$Pr = 0,6678$$

Nakoľko je počet radov rúr ohrievača vody OVZ I. z_2 väčší ako 10 je korekcia na počet radov rúr $C_z = 1$.

Korekcia na geometrickú konfiguráciu zväzku:

$$C_s = \left[1 + \left(2 \cdot \frac{s_1}{d} - 3 \right) \cdot \left(1 - \frac{s_2}{d} \right)^3 \right]^{-2} \quad (11.4 - 9)$$

$$C_s = \left[1 + \left(2 \cdot \frac{0,11}{0,0458} - 3 \right) \cdot \left(1 - \frac{0,08}{0,0458} \right)^3 \right]^{-2}$$

$$C_s = 0,992$$

$$\alpha_k^s = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left(\frac{w_s \cdot D}{v_s} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (11.4 - 10)$$

$$\alpha_k^s = 0,2 \cdot 1 \cdot 0,992 \cdot \frac{4,101 \cdot 10^{-2}}{0,051} \cdot \left(\frac{3,477 \cdot 0,051}{34,231 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,65} \cdot 0,6678^{0,33}$$

$$\alpha_k^s = 36,251 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$$

Teplota steny:

$$t_{st} = \frac{t_{str}^s + t_{str}^v}{2} [^{\circ}C] \quad (11.4 - 11)$$

$$t_{st} = \frac{195 + 110}{2}$$

$$t_{st} = 152,5 ^{\circ}C$$

Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou na strane vzduchu:

Hodnoty pre strednú teplotu 110 °C:

$$\text{Súčiniteľ tepelnej vodivosti spalín} \quad \lambda_v = 3,402 \cdot 10^{-2} W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$$

$$\text{Kinematická viskozita} \quad v_v = 27,64 \cdot 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}$$

$$\text{Prandtlovo číslo} \quad Pr_v = 0,754$$

Opravný súčiniteľ:

$$C_t = \left(\frac{t_{str}^v}{t_{st}} \right)^{0,5} \quad (11.4 - 12)$$

$$C_t = \left(\frac{110}{152,5} \right)^{0,5}$$

$$C_t = 0,849$$

$$\alpha_k^v = 0,023 \cdot \frac{\lambda_v}{d} \cdot \left(\frac{w_v \cdot d}{v_v} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot C_t [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (11.4 - 13)$$

$$\alpha_k^v = 0,023 \cdot \frac{3,402 \cdot 10^{-2}}{0,0458} \cdot \left(\frac{11,213 \cdot 0,0458}{27,64 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,754^{0,4} \cdot 0,849$$

$$\alpha_k^v = 33,704 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$$

Súčiniteľ prestupu tepla:

Súčiniteľ zanesenia volím $\varepsilon = 0,0057 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$.

$$k = \frac{\alpha_k^s}{1 + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_k^s} \right) \cdot \alpha_k^s} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (11.4 - 14)$$

$$k = \frac{36,251}{1 + \left(0,0057 + \frac{1}{33,704} \right) \cdot 36,251}$$

$$k = 15,884 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Logaritmickej rozdiel teplôt:

$$\Delta t_1 = t_1 - t_{\text{OVZ I.}}^{\text{out}} [^{\circ}\text{C}] \quad (11.4 - 15)$$

$$\Delta t_1 = 260 - 200$$

$$\Delta t_1 = 60 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_{\text{OVZ I.}}^{\text{in}} [^{\circ}\text{C}] \quad (11.4 - 16)$$

$$\Delta t_2 = 130 - 20$$

$$\Delta t_2 = 110 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_{\text{ln}} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} [^{\circ}\text{C}] \quad (11.4 - 17)$$

$$\Delta t_{\text{ln}} = \frac{110 - 60}{\ln \frac{110}{60}}$$

$$\Delta t_{\text{ln}} = 82,489 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

Veľkosť výhrevnej plochy:

$$S_{\text{OVZ I.}} = \frac{Q_{\text{OVZ I.}}}{k \cdot \Delta t_{\text{ln}}} \cdot 10^3 [\text{m}^2] \quad (11.4 - 18)$$

$$S_{\text{OVZ I.}} = \frac{1579,61}{15,884 \cdot 82,489} \cdot 10^3$$

$$S_{\text{OVZ I.}} = 1205,574 \text{ m}^2$$

Výrobná teplovýmenná plocha jedného zväzku OVZ I.:

$$S = \pi \cdot D \cdot l_e \cdot z_1 \cdot z_2 [\text{m}^2] \quad (11.4 - 19)$$

$$S = \pi \cdot 0,051 \cdot 2,5 \cdot 25 \cdot 20$$

$$S = 200,276 \text{ m}^2$$

Počet zväzkov prvej časti ohrievača vzduchu OVZ I.:

$$i = \frac{S_{\text{OVZ I.}}}{S} \quad (11.4 - 20)$$

$$i = \frac{1205,574}{200,276}$$

$$i = 6,019$$

Volím šesť zväzkov prvej časti ohrievača vzduchu.

12 Kontroly tepelnej bilancie kotla

Súčtový výkon výparníka:

$$Q_{\text{výp}}^{\text{s}} = Q_{\text{os}} + Q_{\text{mre}} + Q_{\text{ll}} + Q_{\text{vys}} + Q_{\text{lll}}^1 + Q_{\text{lll}}^2 + Q_{\text{lll}}^3 \text{ [kW]} \quad (12.1)$$

$$Q_{\text{výp}}^{\text{s}} = 8753,172 + 58,638 + 798,236 + 200,315 + 208,097 + 252,074 + 140,843$$

$$Q_{\text{výp}}^{\text{s}} = 10411,375 \text{ kW}$$

Súčtový výkon kotla:

$$Q_{\text{vyr}}^{\text{s}} = Q_{\text{výp}}^{\text{s}} + Q_{\text{PP3}} + Q_{\text{PP2}} + Q_{\text{PP1}} + Q_{\text{EKO II.}} + Q_{\text{EKO I.}} + \sum Q_{\text{zr}} \text{ [kW]} \quad (12.2)$$

$$Q_{\text{vyr}}^{\text{s}} = 10411,375 + 716,532 + 1382,24 + 1015,007 + 783,783 + 823,972 + 177,151$$

$$Q_{\text{vyr}}^{\text{s}} = 15310,06 \text{ kW}$$

Odchýlka:

$$\Delta Q = M_{\text{pv}} \cdot Q_{\text{pri}} \cdot \frac{\eta_k}{100} - Q_{\text{vyr}}^{\text{s}} \text{ [kW]} \quad (12.3)$$

$$\Delta Q = 1,876 \cdot 9063,45 \cdot \frac{90,38}{100} - 15310,06$$

$$\Delta Q = 57,280 \text{ kW}$$

Bilančná odchýlka:

$$\Delta_b = \frac{\Delta Q}{M_{\text{pv}} \cdot Q_{\text{pri}} \cdot \frac{\eta_k}{100}} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (12.4)$$

$$\Delta_b = \frac{57,280}{1,876 \cdot 9063,45 \cdot \frac{90,38}{100}} \cdot 100$$

$$\Delta_b = 0,372 \text{ %}$$

Odchýlka je v prípustnom rozmedzí $\pm 0,5 \text{ %}$ podľa [3].

13 Určenie variabilných nákladov

Podľa vyhlášky 184/2012 Z.z. Úradu pre reguláciu sieťových odvetví z 22. júna 2012 sa cena elektriny vyrobenej z obnoviteľných zdrojov energie v zariadení výrobcu elektriny uvedeného do prevádzky od 1. januára 2013 určuje priamym určením pevnej ceny v eurách na megawathodinu zo spaľovania alebo spoluspaľovania kombinovanou výrobou:

- cielene pestovanej biomasy okrem obilnej slamy 112,24 €/MWh
- odpadnej biomasy ostatnej okrem obilnej slamy 122,64 €/MWh [9]

Na určenie ceny tepla je použité rozhodnutie číslo 0087/2013/T úradu pre reguláciu sieťových odvetví pre regulovaný subjekt Dalkia Vráble a.s., podľa ktorého je variabilná zložka maximálnej ceny tepla 0,0492 €/kWh.

Cenníkom firmy Lesy Slovenskej Republiky š.p. pre sortiment drevná energetická štiepka podľa podmienok platných v STN 480057 a STN 480058 je určená cena na expedičnom mieste predávajúceho – drevná energetická štiepka ihličnatá 52,80 €/t s DPH.

Tab. 13.1 Určenie variabilných nákladov vzťahnutých na hodinu prevádzky

PRÍJMY		947,5 €/h
Elektrina	2,5 MWh	306,6 €/h
Teplo	13,028 MWh	640,9 €/h
VÝDAVKY		357,3 €/h
Štiepka	6,768 t/h	357,3 €/h
ROZDIEL		590,2 €/h

Záver

Využívanie biomasy na výrobu elektrickej energie má svoje výhody z hľadiska dostupnosti, ekológie a celkového ekonomického rastu. V prípade rozvíjania tohto sektoru energetiky by došlo k znižovaniu produkcie škodlivých emisií zo spaľovania, k zvyšovaniu rozvoju poľnohospodárstva a lesníctva, a teda aj prípadnému zvyšovaniu nových pracovných miest.

Cieľom diplomovej práce bolo navrhnúť roštový kotol s prirodzenou cirkuláciou pary na spaľovanie drevnej štiepky.

V úvodnej časti diplomovej práce som vykonal základný bilančný výpočet obehu parného kotla na biomasu s protitlakou turbínou.

V ďalších častiach diplomovej práce bol na základe výpočtov navrhnutý kotol tak, aby dosahoval požadovanú dodávku pary s príslušnými parametrami. Pre dané palivo som stechiometrickými výpočtami určil objemy, množstvá a entalpie vzduchu a spalín. Bola vykonaná tepelná bilancia, a tým určené tepelné straty, z ktorých som vypočítal účinnosť kotla $\eta_k = 90,38 \%$. Tepelný výkon kotla je $Q_{\text{vyr}} = 15448,44 \text{ kW}$ a množstvo paliva privedeného do kotla $M_{\text{pal}} = 1,88 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$. Následne som pomocou bilančných výpočtov na strane média vypočítal veľkosť teplovýmenných plôch. V smere prúdu spalín som vykonal tepelnú bilanciú výhrevných plôch zo strany spalín, pričom cieľom bolo dodržanie odchýlky tepelnej bilancie pre celý kotol $\pm 0,5 \%$, čo bolo úspešne splnené.

V závere diplomovej práce som dodatočne vypočítal variabilné náklady okruhu parného kotla na biomasu v zapojení s parnou protitlakou turbínou, ktoré môžu byť použité v ponuke realizácie diela.

Zoznam použitej literatúry

- [1] ČERNÝ, V. a kol. *Parní kotle a spalovací zařízení: Vysokošk. učebnice pro strojní fakulty*. 1. vyd. Praha SNTL. 1975. 526 s.
- [2] KOLAT, P. *Přenos tepla a hmoty*. 3. vyd. Ostrava. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Strojní fakulta. 2001. 266s. ISBN 9788024800035
- [3] ON 070417: 1984, *Tepelný výpočet parných kotlov*.
- [4] DLOUHÝ, T. *Výpočty kotlů a spalínových výměníků*. Praha. České vysoké učení technické. 2007. 212s. ISBN 9788001037577
- [5] BALÁŠ, M. *Kotle a výměníky tepla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně Fakulta strojního inženýrství. 2009. 109s. ISBN 9788021439559
- [6] MILČÁK, P. 2007. *Metodika konstruování v oboru spalování biomasy*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava Fakulta strojní, Katedra energetika. CZ.04.1.03/3.2.15.3/0414 Operační program Rozvoj lidských zdrojů, Opatření 3.2
- [7] HEROSH, J. – SALVET, P. 2007. *Parní kotle, Roštová ohniště pro spalování biomasy*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. CZ.04.1.03/3.2.15.3/0414 Operační program Rozvoj lidských zdrojů, Opatření 3.2
- [8] KADLEC, Z. *Průvodce sdílením tepla pro požární specialisty*. Ostrava. Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství. 2009. 100s. ISBN 9788073850616
- [9] Z. z. č 184/2012: Vyhláška Úradu pre reguláciu sieťových odvetví ktorou sa mení a dopĺňa vyhláška Úradu pre reguláciu sieťových odvetví č. 225/2011 Z. z., ktorou sa ustanovuje cenová regulácia v elektroenergetike v znení vyhlášky č. 438/2011 Z. z.
- [10] JANÍČEK, F. a kol. *Obnovitelné zdroje energie 1*. Bratislava: Renesans, s. r. o. 2007. 176s. ISBN 978-969777-0-3

Zoznam príloh

Príloha č. 1 – Dispozičný výkres umiestnenia teplovýmenných plôch kotla

Príloha č. 2 – Schéma zapojenia kotla